



Marco António dos
Reis Pereira

CLIMATIZAÇÃO DE SALAS DE AULA COM CONTROLO DE CO₂

Dissertação de Mestrado em Energia

Novembro de 2011

Agradecimentos

Chega agora ao fim um semestre bem diferente de qualquer outro. Foi sem duvida o mais difícil de todo o meu percurso académico, mas de certa forma foi também um dos mais enriquecedores. A área de investigação, modelação, programação, que tentei abordar durante o projeto, levou a uma série de adaptações no meu modo de estar e de agir. Posso dizer que nem sempre as coisas correm bem. A busca pelo incerto, os consequentes erros de modelação e programação, os inúmeros resultados inconclusivos. Contudo, é com o superar de cada obstáculo que posso dizer que cresci, em termos de autonomia, de postura prática, como pessoa.

Por isso, e antes de mais, quero agradecer ao Professor Rogério Duarte, pela excelente orientação e apoio que me deu durante todo o trabalho e principalmente por toda a motivação e coragem inculcada nos momentos mais complicados. Quando nada parecia querer funcionar, a sua atitude otimista aliada a uma mente repleta de novas ideias puderam levar o trabalho a bom porto. Agradeço também pela confiança em mim depositada, que nunca faltou ao longo do semestre.

Agradeço ao Eng.º Miguel Santos a disponibilização dos elementos do seu projeto de AVAC da E.S. Gil Vicente e todos os esclarecimentos prestados.

Um agradecimento especial à Carolina Gonçalves (minha namorada), pela amizade, amor, paciência “acrescida” e companheirismo demonstrados ao longo do projeto. A sua contribuição foi imensurável em diversos níveis, mas destaco sobretudo a habilidade com que me apoiou na manutenção da minha sanidade mental. Um especial obrigado por me teres suportado nas etapas mais complicadas.

Agradeço também a todos os colegas e amigos que me acompanharam ao longo de toda esta jornada académica. Agradeço especialmente aos colegas que me acompanharam nesta etapa final, e tão importante do percurso.

Finalmente, mas não por último, agradeço aos meus pais e aos meus irmãos por todo o apoio e confiança que depositaram em mim. Mesmo em momentos de maior dificuldade é a eles que devo grande parte da minha motivação. Sem dúvida alguma que sem o apoio da minha família não estaria onde estou hoje nem seria a pessoa que sou.

O meu Muito Obrigado!

Marco Pereira, novembro de 2011

Resumo

O parque escolar público tem vindo a ser objeto de investimentos significativos de renovação e melhoramento das infraestruturas. A recente regulamentação da qualidade do ar interior tornou-se uma exigência nos edifícios escolares levando a alterações no modo de ventilar as salas de aula, nomeadamente pela adoção de sistemas mecânicos de ventilação e climatização. Para as equipas gestoras escolares, muitas vezes desconhecedoras da importância da qualidade do ar e a braços com severas reduções orçamentais, a ventilação constitui um sorvedouro de recursos difícil de justificar. Importa, portanto, compreender formas de cumprir a regulamentação, assegurar a qualidade do ar e minimizar o custo de exploração dos sistemas de ventilação. Após a contextualização das grandes obras públicas em edifícios escolares concentra-se a atenção numa escola reabilitada pela Parque Escolar. Define-se uma sala de aula tipo e define-se sistemas de climatização com 100% de ar novo e caudal de ar constante (DOAS-CAV) ou caudal de ar variável e controlo de concentração de CO₂ (DOAS-DCV). Modelam-se numericamente os conjuntos sala de aula tipo com: ventilação natural, sistema DOAS-DCV e sistema DOAS-CAV. Procede-se a estudos de validação dos modelos desenvolvidos. Apresentam-se resultados de desempenho dos três conjuntos. Concluem-se vantagens e desvantagens do sistema DOAS-DCV. Critica-se a exequibilidade de ventilar naturalmente salas de aula, face à atual legislação.

Palavras-chave: Climatização, Controlo, Dióxido-de-Carbono, Qualidade-do-Ar-Interior, Escola, Sala-de-aula, Simulação-Energética-de-Edifícios, EnergyPlus.

Abstract

Based on data from Parque Escolar reports and on data gathered from an actual refurbished secondary school, a typical classroom; constant air volume (CAV) and demand control ventilation (DCV) dedicated outdoor air systems (DOAS) are described. The advantages and disadvantages of the DCV-DOAS system are discussed, based on thermal comfort, indoor air quality (IAQ) and energy consumption results, and by comparing: the naturally ventilated typical classroom; the typical classroom heated and cooled with the DCV-DOAS and the CAV-DOAS systems. Traditional natural ventilation design of classrooms is discussed, considering the constraints introduced with the current IAQ legislation.

Keywords: Demand-Control-Ventilation, Indoor-Air-Quality, Schools, Classrooms, Building-Energy-Simulation, EnergyPlus.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice.....	1
Lista de Figuras.....	3
Lista de Tabelas	5
Lista de Siglas e Acrónimos	7
Lista de Símbolos	9
Capítulo 1 Introdução	11
1.1. As grandes obras públicas em edifícios escolares	11
1.2. Regulamentação sobre a qualidade do ar no interior de edifícios	15
1.3. Climatização de edifícios escolares	19
1.4. Organização da tese	21
1.5. Interesse e contributos originais da tese.....	22
Capítulo 2 Uma escola JCETS-MOP (pós reabilitação Parque Escolar)	25
2.1. Conjunto edificado.....	25
2.2. Sala de aula tipo (pós Parque Escolar)	29
2.3. Sistema de climatização	31
Capítulo 3 A Modelação.....	35
3.1. Programa EnergyPlus.....	35
3.2. Sala de aula tipo.....	38
3.3. Condições interiores de projeto	42
3.4. Sistemas de climatização	44
3.4.1. DOAS-CAV.....	45
3.4.2. DOAS-DCV.....	46
Capítulo 4 Validação da Modelação	49
4.1. Comportamento da sala de aula	49
4.2. Comportamento dos sistemas de climatização	53
4.2.1. DOAS-CAV.....	53

4.2.2. DOAS-DCV.....	56
Capítulo 5 Resultados.....	61
5.1. DOAS-DCV versus DOAS-CAV	62
5.2. DOAS-DCV versus Ventilação Natural	63
Capítulo 6 Conclusão.....	67
6.1. Conclusões dos estudos realizados.....	67
6.2. Temas para desenvolvimento futuro	68
Referências	69
Anexo.A Sobre o clima de Lisboa.....	A.1
Anexo.B Sobre os modelos de infiltração / ventilação natural no EnergyPlus.....	B.1
Anexo.C Sobre a equação do decaimento	C.1

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Sistema de climatização (tipo DOAS) para uma sala de aula (ASHRAE, 2007).....	19
Figura 2.1 – Planta da E.S. Gil Vicente, vista de satélite. (fonte: <i>GoogleEarth</i> , acedido em junho de 2011).....	26
Figura 2.2 – Fachadas Norte, Sul, Este e Oeste da E.S. Gil Vicente (fonte: <i>GoogleEarth</i> , acedido em junho de 2011).....	26
Figura 2.3 – Planta da E.S. Gil Vicente: (a) antes da intervenção; (b) depois da intervenção pela Parque Escolar.....	27
Figura 2.4 – Núcleo central: (a) fachada norte; (b) fachada sul depois da intervenção pela Parque Escolar.	28
Figura 2.5 – Fotografia de sala de aula e configuração tipo de sala de aula preconizada pela Parque Escolar (2009).....	30
Figura 2.6 – Vista em perspetiva da sala estudada.	31
Figura 2.7 – Ventilação das salas de aula (situação de inverno).	32
Figura 2.8 – Esquema de princípio da rede aerólica da E.S. Gil Vicente.....	32
Figura 3.1 – Princípio de interação dos módulos no EnergyPlus.....	37
Figura 3.2 – Sala de aula com dois vãos envidraçados com controlo independente de sombreamento móvel exterior e ponto onde se mede a iluminância e nível de encadeamento, junto ao plano do quadro.	40
Figura 3.3 – Esquema de princípio da rede aerólica. Sistema DOAS-CAV.	45
Figura 4.1 – Validação do sistema DOAS-CAV.	55
Figura 4.2 – Validação do sistema DOAS-DCV.	59
Figura A.1 – Valores semanais de graus-hora de (a) aquecimento (base 20°C) e (b) arrefecimento (base 26°C).	A.2
Figura A.2 – Valores semanais de (a)energia solar direta normal e (b) energia difusa horizontal	A.3
Figura A.3 – Valores semanais de energia solar incidente total e energia	

solar incidente direta em superfícies verticais orientadas a (a) Norte e (b) sul.....	A.4
Figura B.1 – Temperaturas e concentração de CO ₂ na sala de aula: a) modelo de infiltração DOE2; b) Modelo de infiltração BLAST	B.2
Figura B.2 – (a) Pormenor da 3ª semana de dezembro da Figura B.1 e (b) detalhe de temperatura exterior e caudal de infiltração. Modelo infiltração DOE2.....	B.4
Figura C.1 – Evolução de concentração de CO ₂ ao longo de um dia – Comparação entre resultados analíticos e resultados obtidos com o programa EnergyPlus.	C.3

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Caudais mínimos de ar novo (RSECE, 2006).	17
Tabela 1.2 – Concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios existentes (RSECE, 2006).....	18
Tabela 3.1 – Características dos elementos construtivos da envolvente.....	38
Tabela 3.2 – Ganhos internos na sala de aula.....	39
Tabela 3.3 – Perfil de ocupação da sala de aula.	39
Tabela 3.4 – Perfil de infiltração/ventilação natural quando se modelam sistemas de climatização.	41
Tabela 3.5 – Categorias definidas na norma EN 15251 (2007).	42
Tabela 3.6 – Concentração de CO ₂ a usar em projeto (EN 15251, 2007).	43
Tabela 3.7 – Temperaturas interiores de projeto para dimensionamento de edifícios e sistemas AVAC (EN 15251, 2007).....	43
Tabela 3.8 – Gama de temperaturas interiores admissíveis aquando do cálculo horário das cargas térmicas (EN 15251, 2007).....	43
Tabela 3.9 – Parâmetros de projeto relativos a iluminação (EN 15251, 2007) – Apenas informativo.	44
Tabela 4.1 – Diferenças entre sala de aula tipo reabilitada e sala de aula de validação.....	50
Tabela 4.2 – Resultados dos estudos de validação da modelação numérica da sala de aula de validação. Período entre dezembro e fevereiro, dias úteis do calendário escolar das 7h00 às 18h00, num total de 520 h.....	51
Tabela 5.1 – Caracterização do desempenho da sala de aula tipo com o sistema DOAS-DCV e comparação com o desempenho da mesma sala com o sistema DOAS-CAV. Apresentam-se ainda dados do ambiente exterior. Período anual, dias úteis do calendário escolar das 7h00 às 18h00, num total de 1740 h.	62
Tabela 5.2 – Caracterização do desempenho da sala de aula tipo com o sistema DOAS-DCV e comparação com o desempenho da	

mesma sala ventilada de modo natural (1,5 ren./h e 3,0 ren./h). Apresentam-se ainda dados do ambiente exterior. Período entre dezembro e fevereiro, dias úteis do calendário escolar das 7h00 às 18h00, num total de 511 h.64

Lista de Siglas e Acrónimos

ANSI	<i>American National Standard Institute</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BES	<i>Buinding Energy Simulation</i>
BESTEST	<i>Buinding Energy Simulation Test</i>
BLAST	<i>Building Loads Analysis na System Thermodynamics</i>
CAV	<i>Constant Air Volume</i>
COP	<i>Coefficient of Performance</i>
DCV	<i>Demand Control Ventilation</i>
DOAS	<i>Dedicated Outdoor Air System</i>
DOE	<i>[United States of America] Department of Energy</i>
EER	<i>Energy Efficiency Ratio</i>
EMS	<i>Energy Management System</i>
E.P.E	Entidade Pública Empresarial
E.S.	Escola Secundária
JCETS-MOP	Junta das Construções para o Ensino Técnico Superior – Ministério das Obras Públicas
PIB	Produto Interno Bruto
QAI	Qualidade do ar interior
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização nos Edifícios
SCE	Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do ar interior
TRY	<i>Typical Reference Year</i>
UGR	<i>Unified Glaring Rate</i>
UTAN	Unidade de Tratamento de Ar Novo
VAV	Volume de Ar Variável

Lista de Símbolos

Carateres Romanos

A	– Fator adimensional
B	– Fator adimensional
C	– Fator adimensional
\dot{m}	– Caudal mássico, kg/s
n	– Número de ocupantes, adimensional
S	– Caudal mássico, kg/s, ou; – Potência térmica gerada, W/pessoa
T	– Temperatura, °C
t	– Tempo, s
V	– Volume, m ³
\dot{V}	– Caudal volúmico, m ³ /s
v	– Velocidade, m/s

Carateres Gregos

Δ	– Variação (de uma propriedade)
ρ	– Massa específica, kg/m ³
ϕ	– Concentração de CO ₂ , ppm

Índices

0	– Relativo a condição inicial
1	– Relativo a insuflação / insuflado
CO_2	– Relativo a concentração de CO ₂
ext	– Relativo a exterior
int	– Relativo a interior
$nominal$	– Relativo a valor nominal de uma determinada propriedade
$pessoa$	– Relativo ao número de ocupantes na sala de aula
V	– Relativo a caudal volúmico
ϕ	– Relativo a concentração de CO ₂

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo contextualiza as recentes obras públicas em edifícios escolares e a atividade de reabilitação levada cabo pela Parque Escolar. Introduce conceitos de qualidade do ar interior (QAI) impostos pela recente regulamentação aplicável a edifícios novos e grandes remodelações. Aborda a climatização em edifícios escolares referindo sistemas aconselhados na bibliografia internacional. Descreve, por último, o modo como se organiza a tese e explica o interesse do estudo proposto, assim como os seus contributos originais.

1.1. As grandes obras públicas em edifícios escolares

O investimento na qualificação e educação tem constituído uma linha de aposta comum aos diversos governos europeus, nomeadamente ao governo português.

Sendo a educação um fator de competitividade de um país e uma alavanca de igualdade social, torna-se necessário investir na renovação do parque escolar público. A recuperação e requalificação das escolas públicas constitui assim, em parte, um fator imprescindível para a qualificação da população portuguesa, condição indispensável para que Portugal recupere o atraso que o distancia de grande parte dos países da União Europeia (BBC News, 2007).

Portugal tem feito, ao longo dos últimos trinta anos, um esforço significativo para a qualificação da população a todos os níveis de ensino, no entanto, o nosso país continua a apresentar baixos níveis de escolarização: cerca de 3.500.000 dos atuais ativos têm um nível de escolaridade inferior ao ensino secundário, dos quais 2.600.000 inferior ao 9.º ano. A expansão e requalificação de todo o parque escolar representa, então, um passo decisivo para dotar o sistema educativo de uma melhor capacidade de resposta aos desafios de prolongamento da escolarização e de reforço da qualidade do ensino. Este facto contribui para superar os défices estruturais de formação e de qualificação que Portugal apresenta, na medida em que, o investimento em capital humano valoriza não só o desenvolvimento pessoal como, também, o crescimento económico do país medido através da evolução do PIB, da produtividade ou da competitividade.

No que diz respeito ao PIB, estima-se que no espaço da União Europeia a elevação em um ano do nível médio de escolaridade se traduza no aumento da taxa de crescimento anual entre 0,3 a 0,5 pontos percentuais (Novas Oportunidades, 2010). Como tal, o Governo português aposta na criação da Parque Escolar com o intuito de superar o atraso educativo

português face aos padrões europeus e garantir, assim, uma melhor integração de todas as crianças e jovens na escola e proporcionando-lhes uma ambiente de aprendizagem motivador, exigente e gratificante.

A Parque Escolar, E.P.E (entidade pública empresarial), erigida pelo Governo tem por objetivo assegurar o “planeamento, gestão, desenvolvimento e execução do processo de modernização e manutenção da rede pública das escolas secundárias e outras afetas ao Ministério da Educação” (artigo 4.º, Diário da República, 1.ª série- n.º 37- 21 de fevereiro de 2007). Esta entidade de direito público (de natureza empresarial) é dotada de autonomia administrativa, financeira e patrimonial e possui capacidade de atuação no que respeita à “contratação de empreitadas de obras públicas e à locação de bens e serviços” garantindo os interesses do Estado (Decreto-Lei nº 41/2007, 21 de fevereiro; Parque Escolar, 2011a).

Deste modo, o programa de modernização da Parque Escolar assenta em três objetivos fundamentais.

O primeiro refere-se à requalificação e modernização dos edifícios das escolas do Ensino Secundário, potenciando uma cultura de aprendizagem, divulgação do conhecimento e aquisição de competências. A concretização deste objetivo baseia-se numa série de intervenções que permitam a eficácia física e funcional do edifício, numa perspetiva de criar condições para a prática de um ensino moderno, adaptado aos conteúdos programáticos, às didáticas e às novas tecnologias de informação e comunicação. Estas intervenções passam por corrigir problemas construtivos existentes nos edifícios, melhorar as suas condições de habitabilidade e de conforto ambiental, conferindo especial atenção à higrotérmica, à acústica, à qualidade do ar, à segurança e à acessibilidade. Por outro lado, pretende-se adequar os espaços letivos e não letivos e moderniza-los com os respetivos equipamentos, garantindo flexibilidade e adaptabilidade e maximizando a sua utilização. Para além disto, estas intervenções visam garantir a eficácia energética dos edifícios de modo a reduzir os custos de operação.

Um outro objetivo da Parque Escolar consiste na abertura da Escola à comunidade, criando condições funcionais e de segurança para permitir uma maior articulação com o meio urbano em que se inserem garantindo o aproveitamento integral das potencialidades instaladas na infraestrutura escolar. Desta forma, os edifícios passam a poder ser utilizados pela comunidade nos horários pós ou extraescolares no âmbito das atividades associadas à formação contínua (pós-laboral), aos eventos culturais e sociais, ao desporto e ao lazer.

Por último, como referido no seu sítio (Parque Escolar, 2011a), a Parque Escolar pretende criar um novo modelo de gestão das instalações, garantindo uma otimização dos recursos instalados e uma correta gestão da conservação e manutenção dos edifícios após a intervenção. Desta forma, garantir-se-á uma resposta eficaz às intervenções pontuais de reparação ou às intervenções programadas de conservação e manutenção e fomentar-se-á, ainda, a correta utilização das instalações e equipamentos, formando e responsabilizando os seus utilizadores (Parque Escolar, 2011a).

Tendo como referência os objetivos enumerados, a Parque Escolar determinou como visão ser reconhecida como uma “empresa pública de referência nos domínios da inovação e sustentabilidade, assegurando a satisfação de todas as suas partes interessadas pela qualidade e excelência dos seus serviços”.

A estratégia de desenvolvimento sustentável da Parque Escolar assenta na prestação de um serviço com valor acrescentado e inovador, de desenvolvimento de capital humano, desenvolvimento social, consolidação económico-financeira e preservação ambiental.

Como tal, a sua intervenção nas escolas reporta a um conjunto de referências internacionais sobre sustentabilidade e responsabilidade social das organizações.

De acordo com este propósito, esta intervenção de recuperação e modernização de edifícios será realizada tendo em conta um conjunto de princípios que passam, nomeadamente, pelo cumprimento integral da legislação. Deste modo, todos os processos que envolvam a recuperação e modernização dos edifícios escolares, desde a contratação de serviços à elaboração do projeto e execução da obra, irão cumprir todas as obrigações que decorrem da lei. Serão tidas em conta normas de segurança e fiscalização, normas de construção e equipamento dos edifícios, normas relativas às condições de habitabilidade dos espaços, normas ambientais e de eficiência energética, entre outras.

Um outro princípio diz respeito à adequação de todos os espaços às novas necessidades e desafios do ensino, que se encontram associadas às novas práticas pedagógicas e à evolução tecnológica dos métodos de ensino-aprendizagem. Assim, é garantida a articulação e o funcionamento integrado dos vários setores funcionais da escola (áreas letivas e não letivas) e a abertura de setores para a utilização por parte da comunidade em períodos pós-letivos. Este princípio da intervenção de recuperação e modernização adotado pela Parque Escolar garante ainda a flexibilidade e durabilidade das instalações no tempo para garantir resposta a todos os programas de ensino que possam vir a ser determinados pelo Ministério da Educação.

Por outro lado, um outro princípio adotado pela Parque Escolar nos projetos de recuperação e modernização e que importa salientar diz respeito ao conforto dos edifícios. Esta empresa pública pretende reunir todas as condições acústicas, de iluminação, climatização e ventilação, ergonómicas e de segurança de forma a assegurar o conforto diário de todos os utilizadores. Por exemplo será tido em conta a tipologia dos edifícios, o design, o isolamento, a disposição e os elementos da envolvente dos edifícios, a compartimentação e cores interiores, entre outros.

No que concerne à sustentabilidade ambiental a Parque Escolar compromete-se com o desenvolvimento de soluções de projeto com uma forte preocupação na eficiência energética e que permitam explorar o potencial de produção energética dos espaços escolares, a nível das energias renováveis, através da instalação de painéis solares térmicos para o aquecimento de água e a preparação do edifício para futura implementação de um sistema de produção de energia elétrica e venda à rede.

A preservação da biodiversidade e do património arquitetónico e cultural, isto é, a preservação de bens de natureza arqueológica, arquitetónica e etnológica serão também princípios a ter em consideração nos projetos desenvolvidos pela Parque Escolar (Parque Escolar, 2010).

Analisando, assim, todos os princípios da intervenção de recuperação e modernização dos edifícios escolares assegurados pela Parque Escolar, pode constatar-se que uma melhoria nas condições da rede de escolas públicas e um bom projeto de arquitetura pode contribuir para melhorar a qualidade do processo de ensino-aprendizagem e que o espaço físico da escola também constitui uma ferramenta educativa (BBC News, 2007; Parque Escolar, 2010).

Desta forma, a Parque escolar, em conformidade com o Governo, deliberou um Programa de Modernização, estabelecendo critérios de seleção das escolas a intervir e criando objetivos concretos para as diferentes fases de intervenção de recuperação e modernização dos Edifícios Escolares. Assim, os Edifícios Escolares foram selecionados segundo o grau de degradação, a carência de instalações, o reordenamento da rede Escolar, a otimização de financiamento comunitário e a distribuição geográfica.

A aplicação deste programa levou a Parque Escolar a delinear rigorosamente os prazos e o número de espaços a intervir e a estabelecer uma estratégia para maximizar a sua capacidade de intervenção nas Escolas garantindo o compromisso com a qualidade e segurança da vida Escolar.

Neste sentido, foi estabelecida uma calendarização rigorosa de todo o programa e este foi estruturado em quatro fases (Fase 0, Fase 1, Fase 2, Fase 3).

O início das intervenções surge no ano letivo 2007- 2008 (Fase zero - intervenções piloto) tendo sido selecionadas quatro escolas com um investimento estimado na ordem dos 70 milhões de euros. No que concerne à Fase 1 do Programa de Modernização esta decorreu no ano letivo 2008-2009 com um investimento estimado de 327 milhões de euros e foram realizadas intervenções em 26 escolas sendo que, no final do ano 2009, encontravam-se concluídas 15 escolas. As restantes escolas, por se tratar de edifícios históricos exigem um período de intervenção mais alargado e, como tal, prevê-se a sua conclusão para o ano de 2010.

No ano letivo 2009-2010 a Parque Escolar deu início à Fase 2 tendo sido intervencionadas 75 escolas com um investimento estimado de 952 milhões de euros.

Para a Fase 3, ainda no período 2009-2010, estão planeadas intervenções ao nível de 100 escolas, com investimento estimado de 1.151 milhões de euros (Parque Escolar, 2010).

Importa salientar a importância dada pela Parque Escolar à remodelação ao nível das instalações térmicas nomeadamente nas áreas da climatização e ventilação dos edifícios. Por esta razão, esta empresa pública tem em conta quatro pilares fundamentais para garantir uma maior eficiência energética dos edifícios sendo estes a Construção Eficiente, o Programa Renováveis na Escola, Poupança Energética e Formação e Consciencialização.

Tendo por base uma construção eficiente, a Parque Escolar pretendeu garantir que os edifícios escolares possuem certificação energética e que são renovados e modernizados tendo em conta vários elementos, nomeadamente os sistemas de iluminação (de forma a possuírem elevado rendimento), o aquecimento de águas sanitárias (através de painéis solares), os isolamentos térmicos (com valores de U adequados), os envidraçados (com fator solar adequado), os sistemas de climatização (com elevados rendimentos) e a gestão térmica centralizada (sistemas de AVAC e iluminação).

Relativamente ao Programa Renováveis na Escola, a Parque Escolar pretende criar cerca de 350 escolas miniprodutoras de energia térmica contribuindo para o desenvolvimento de um modelo energético descentralizado, que coloca a produção próxima do consumo, permitindo a redução das necessidades de redes e a redução das perdas no transporte. Além disto, com este programa pretende contribuir para o aumento da produção de base renovável do País, para a redução da dependência energética do exterior e emissões de CO₂ e para a dinamização dos setores ligados à produção de energias renováveis e soluções de eficiência energética.

Por outro lado, a Parque Escolar aposta na poupança energética e em parceria com o programa *Connected Urban Development* e, utilizando o *software EnergyWise*, efetuará a monitorização dos consumos energéticos de forma a desenvolver um modelo de gestão e utilização dos edifícios que garanta uma maior eficiência e racionalização dos consumos.

Por último, a Parque Escolar tem por objetivo apoiar as Escolas desenvolvendo ações de sensibilização para a temática da eficiência energética tendo por base a consciencialização e formação dos utilizadores para que estes usufruam dos edifícios, dos equipamentos e dos sistemas de forma a contribuírem para um nível energético mais eficiente (Parque Escolar, 2010).

1.2. Regulamentação sobre a qualidade do ar no interior de edifícios

De acordo com a Diretiva nº 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de dezembro foi estabelecido, relativamente ao desempenho energético dos edifícios, que os Estados Membros da União Europeia devem implementar um sistema de certificação energética de forma a informar o cidadão sobre a qualidade térmica dos edifícios.

Desta forma, os Estados Membros são obrigados a garantir a efetiva implementação dos requisitos mínimos regulamentares de desempenho energético de forma a assegurar a eficiência energética, permitindo aos utentes a obtenção de informação acerca dos consumos de energia através da certificação energética dos edifícios.

As inspeções efetuadas no âmbito da certificação, embora visem o desempenho energético de caldeiras e instalações de ar condicionado, devem também visar a existência de uma boa QAI no edifício, isento de riscos para a saúde pública e potenciador do conforto e da produtividade. Desta forma, assegura-se uma adequada manutenção da QAI minimizando o risco de problemas e devolvendo ao público utilizador a confiança nos ambientes tratados com sistemas de climatização.

As inspeções no âmbito da certificação energética são regulamentadas pela atual legislação nomeadamente, o Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização nos Edifícios (RSECE, 2006) e o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, 2006). Esta legislação estabelece os critérios de conformidade a serem observados nas inspeções e define os requisitos a serem aferidos relativamente à QAI, a eficiência energética, entre outros.

Na certificação energética e na qualidade do ar interior dos edifícios é exigida uma quantidade significativa de meios humanos qualificados e independentes. Deste modo, foi estabelecido que o sistema de certificação começaria por ser aplicado de uma forma faseada, tendo início nos edifícios maiores e abrangendo gradualmente um universo cada vez mais amplo, à medida que a experiência se for consolidando.

No âmbito de aplicação, estão abrangidos todos os novos edifícios assim como os existentes sujeitos a grandes intervenções de reabilitação (nos termos do RSECE e do RCCTE) independentemente de estarem ou não sujeitos a licenciamento ou autorização da entidade competente, os edifícios existentes sujeitos periodicamente a auditorias (conforme especificado no RSECE) e os edifícios existentes para habitação ou serviços, na celebração de contratos de venda, locação ou arrendamento.

Neste sentido, o Estado Português assume um compromisso para com o país, agindo, em parceria com a Parque Escolar, sempre de forma a que os seus projetos sejam um exemplo e garantam o cumprimento de toda a legislação subjacente e assegurem a qualidade de vida e o bem estar de todos os seus utilizadores (Parque Escolar, 2011a).

Em conformidade e no seguimento da publicação dos diplomas realizada a 4 de abril de 2006, que tinham como intuito a melhoria do desempenho energético e da QAI dos edifícios, surge a necessidade de definir a calendarização da aplicação do Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do ar interior (SCE, 2006).

Deste modo, e em cumprimento com a diretiva 2002/91/CE, esta calendarização tem como objetivo a aplicação efetiva do sistema de certificação a edifícios de diferentes tipologias, dimensões e afins, devendo estar em pleno funcionamento até 1 de janeiro de 2009.

A calendarização foi efetuada em três fases, começando por abranger todos “os novos edifícios destinados à habitação com área útil superior a 1000 m² e os edifícios de serviços, novos ou que sejam objeto das grandes obras de remodelação, cuja área útil seja superior aos

limites mínimos estabelecidos n.ºs 1 ou 2 do artigo 27.º do Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de abril, de 1000 m² ou de 500 m², consoante a respetiva tipologia, cujos pedidos de licenciamento ou autorização de edificação sejam apresentados à entidade competente a partir de 1 de julho de 2007” (Diário da República, 2.ª Série – N.º 108 – 5 de junho de 2007).

A segunda fase passa por abranger, por parte do SCE, todos os novos edifícios independentemente da sua área ou afins, desde que o seu licenciamento ou autorização de edificação seja apresentada à entidade competente a partir de 1 de julho de 2007.

Por último, a terceira fase consiste na aplicação do SCE a todos os edifícios abrangidos pelo Decreto-Lei n.º 78/2006, de 4 de abril, a partir de 1 de janeiro de 2009.

Como a Parque Escolar se assume com uma empresa direcionada para grandes intervenções de recuperação e de modernização, encontra-se abrangida pela legislação mencionada e, por esta razão, está sujeita à implementação do Sistema de Certificação Energética, tendo a obrigação de cumprir a legislação não só relativamente ao desempenho energético das instalações como também à QAI (Portaria n.º 461/2007, 5 de junho).

De acordo com o (RSECE, 2006) são impostos requisitos relativamente à QAI, nomeadamente no que diz respeito a concentrações máximas em edifícios existentes e a caudais mínimos de renovação de ar, de acordo com as tipologias dos espaços. O regulamento vem impor o conceito de eficiência energética nos sistemas de climatização de forma a permitir melhorar o seu desempenho energético efetivo e garantir os meios para a manutenção de uma boa QAI, quer a nível de projeto, quer a nível da sua instalação, quer durante o seu funcionamento, através da exigência de uma manutenção adequada.

Desta forma, para garantir a QAI, os edifícios abrangidos pelo regulamento (nomeadamente, da Parque Escolar) devem ser dotados de meios naturais, mecânicos ou híbridos que consigam garantir as taxas de renovação de ar exigidas pelo regulamento, garantindo os caudais mínimos de ar novo. De acordo com a Tabela 1.1 são definidos os caudais mínimos de ar novo em função da tipologia dos espaços existentes nas escolas¹.

Tabela 1.1 – Caudais mínimos de ar novo (RSECE, 2006).

Tipo de Atividade		Caudais mínimos de ar novo
		[m ³ /(h.ocupante)]
Escolas	Salas de aula	30
	Laboratórios	35
	Auditórios	30
	Bibliotecas	30
	Bares	35

¹ Os valores apresentados devem ser afetados pela eficiência de ventilação (RSECE, 2006).

A concentração máxima de poluentes existentes nos espaços é igualmente definida (Tabela 1.2) exigindo, na prática, o recurso à ventilação mecânica para se efetuar o controlo desses poluentes.

Tabela 1.2 – Concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios existentes (RSECE, 2006).

Parâmetros	Concentração máxima de referência (mg/m ³)
Partículas suspensas no ar (PM10)	0,15
Dióxido de carbono	1800*
Monóxido de carbono	12,5
Ozono	0,2
Formaldeído	0,1
Compostos orgânicos voláteis totais	0,6

* Aproximadamente 1000 ppm.

O cumprimento do regulamento no que diz respeito à QAI nas salas de aula implica, de acordo com a Tabela 1.1, uma ventilação mecânica com caudais de 30 m³/(h.ocupante). Atendendo ao elevado número de salas de aula de uma escola, facilmente são atingidos valores de caudais de ar a movimentar elevados. Ou seja, para o cumprimento da regulamentação (RSECE, 2006) as novas/remodeladas escolas deparam-se com um consumo de energia adicional outrora inexistente.

1.3. Climatização de edifícios escolares

Tradicionalmente os edifícios escolares não são climatizados, sendo apenas ventilados de modo natural. Existem, no entanto, recomendações por parte de organizações como a ASHRAE sobre como climatizar escolas. A Figura 1.1 apresenta o sistema de climatização de salas de aula preconizado pela ASHRAE (ASHRAE, 2007).

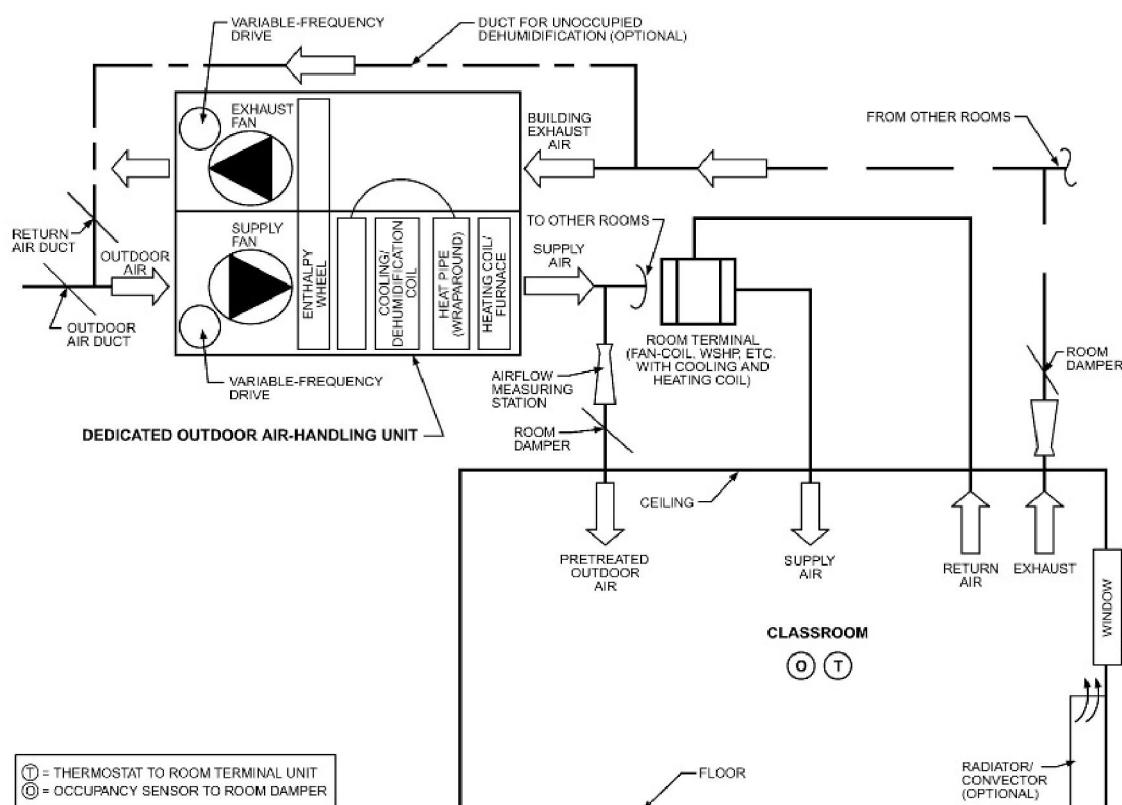


Figura 1.1 – Sistema de climatização (tipo DOAS) para uma sala de aula (ASHRAE, 2007).

De acordo com a ASHRAE a climatização de salas de aula deve ser efetuada por um sistema dedicado ao tratamento do ar exterior: DOAS – *Dedicated Outdoor Air System*. Este sistema funciona segundo o seguinte princípio: A UTAN (Unidade de Tratamento de Ar Novo) neutraliza as cargas térmicas de 100% de ar novo; unidades terminais – na Figura 1.1 do tipo *displacement* – neutralizam apenas as cargas térmicas da sala de aula (envolvente e ganhos internos).

As funções da unidade de tratamento de ar podem consistir recuperação de calor, arrefecimento, desumidificação, aquecimento, humedificação (filtragem onde apropriado) do ar exterior. Como se observa na Figura 1.1, trata-se de um sistema de caudal variável.

A ASHRAE recomenda ainda o uso de unidades terminais do tipo *displacement*, que permitem maior conforto térmico e maior eficiência de ventilação, e o emprego de radiadores ou convetores de apoio no paramento inferior da parede exterior.

Outro aspeto que merece destaque por parte das ASHRAE é o tipo de controlo do sistema DOAS. Para garantir uma adequada qualidade do ar no interior da sala de aula e promover a eficiência energética a ASHRAE aconselha a implementação do seu *Standard* 62.1 (2007). Este *standard* prevê a possibilidade de monitorizar a concentração de CO₂ nas salas de aula – relacionada com a ocupação –, com o objetivo de controlar o caudal de ar novo insuflado. De acordo com ASHRAE (2007) o controlo de ventilação por concentração de CO₂ é simples, fiável e conduz a poupanças, especialmente quando se climatizam múltiplas zonas com cargas térmicas muito variáveis, como é o caso de salas de aula.

São muitos os artigos onde se analisam criticamente os sistemas de ventilação com controlo de CO₂ – designados na nomenclatura anglo-saxónica (Emmerich, 2001), [CO₂] *Demand Control Ventilation* (DCV). Refiram-se Murphy (2008), Leephakpreeda (2001), Apte (2006), Persily (2003), Emmerich (2001). Estes artigos concluem a vantagem que esta tecnologia possui em termos de QAI e poupança de energia.

Em resumo estes estudos apontam que o projeto de sistemas de AVAC baseado em caudais de ventilação determinados a partir do número de ocupantes de projeto conduz a sobreventilação dos espaços. Ainda que isto possa ser vantajoso para a produtividade dos ocupantes (vejam-se os estudos de Wargocki, 2011a e Wargocki 2011b), trata-se de uma evidente desvantagem energética, pois aumenta significativamente os consumos associados ao sistema AVAC. Ao eliminar a sobreventilação, os sistemas DCV reduzem significativamente estes consumos.

Persily (2003) refere que as reduções anuais de consumo de energia com o uso de DCV dependem da tipologia do espaço, do clima e da estratégia de ventilação, podendo variar entre 10% e 80%. Edifícios de escritórios possuem em geral reduções de 20%, face a um padrão de ocupação estável. Espaços com ocupação mais variável possuem reduções mais elevadas. No relatório de Emmerich (2001) referem-se reduções em escolas entre 20% e 40%.

Os sistemas DCV não são, no entanto, isentos de crítica. Com efeito, Apte (2006) salienta os seguintes defeitos: (i) instabilidade, deriva e reduzida fiabilidade de sensores de CO₂ usados no controlo de sistemas DCV; (ii) existência de poluentes nas salas, para além de bioefluentes humanos, cuja deteção não se associa à concentração de CO₂; (iii) incerteza dos valores máximos a adotar para a concentração de CO₂ nas salas. Jenkins (2002) refere, ainda, (iv) o aumento dos custos de manutenção.

Para contornar e evitar os defeitos acima referidos, aquando do projeto de sistemas DCV deve-se proceder a uma avaliação cuidada dos sensores de CO₂ utilizados, assegurando a sua fiabilidade e desempenho e ter especial atenção às características específicas destes sensores de forma a estabelecer um rigoroso plano de manutenção (Apte, 2006). Deve-se, também,

definir um caudal mínimo de ventilação por unidade de área de pavimento e restringir o uso de sistemas DCV a espaços que não possuam emissões de poluentes de materiais ou processos significativas. Para contornar a ausência de consenso científico relativamente ao valor máximo de concentração de CO₂ nas salas, um valor conservador deve ser usado no projeto; Jenkins (2002) propõe 800 ppm; a norma EN15251 (2007) aponta para 900 ppm; a regulamentação nacional (RSECE, 2006) impõe 1000 ppm.

Concluindo, da revisão bibliográfica efetuada pode salientar-se a existência de um elevado número de artigos e relatórios sobre climatização de salas de aula com controlo de CO₂, assentes quer em simulação numérica, quer em trabalhos de campo. Os estudos apontam para o interesse do uso desta tecnologia em salas de aula e em geral em espaços onde existam variações na ocupação, onde seja necessário aquecer e/ou arrefecer durante a maior parte do ano e onde sejam reduzidas as emissões de poluentes com origem em materiais e processos.

Pelo facto de evitarem a sobreventilação nos espaços, os sistemas DCV reduzem significativamente o consumo de energia, podendo-se esperar reduções em escolas da ordem de 20% a 40%.

1.4. Organização da tese

O presente documento encontra-se organizado segundo a forma seguidamente descrita.

Após a revisão bibliográfica apresentada no capítulo 1, que aponta para as vantagens energéticas dos sistemas de climatização com controlo de CO₂, descreve-se no capítulo 2 uma escola nacional do tipo JCETS-MOP (Parque Escolar, 2011a), a Escola Secundária Gil Vicente (doravante designada como E.S. Gil Vicente), em Lisboa. Esta escola foi objeto de uma recente reabilitação pela Parque Escolar, possuindo um sistema de ventilação das salas de aula com controlo de CO₂. Neste mesmo capítulo caracterizam-se o conjunto edificado, o sistema de climatização e as salas de aula, com vista à modelação do comportamento térmico e consumo energético associado a uma sala de aula tipo climatizada.

No capítulo 3 introduzem-se os pressupostos usados para modelação de uma sala de aula tipo com o programa EnergyPlus. Este capítulo descreve a sala de aula tipo, as condições interiores de projeto (as condições exteriores para Lisboa são discutidas no Anexo A), descreve os dois sistemas de climatização modelados e apresenta (de modo sumário) o programa EnergyPlus. Os dois sistemas de climatização modelados são: (i) sistema DOAS-CAV com caudal constante; (ii) sistema DOAS-DCV com caudal variável função da concentração de CO₂. Ambos os sistemas visam, fundamentalmente, a neutralização das cargas térmicas do ar exterior. O sistema DOAS-DCV, porque pode variar o caudal ar insuflado, permite atuar ao nível das cargas térmicas na sala, contudo, também neste sistema é a qualidade do ar interior – concentração de CO₂ – quem possui maior autoridade.

No capítulo 4 discute-se a validação dos modelos utilizados na modelação numérica. Numa primeira secção aborda-se a validação da modelação da sala de aula tipo, por confronto de resultados numéricos com valores de temperatura e concentração de CO₂ em salas de aula apresentados na literatura científica. Nas secções seguintes aborda-se a validação da modelação dos sistemas de climatização, verificando-se se as leis de controlo modeladas produzem os resultados esperados.

O capítulo 5 apresenta e discute os resultados de modelação da sala de aula tipo definida no capítulo 3 quando esta é climatizada com os sistemas DOAS-CAV e DOAS-DCV e quando se admite que esta é ventilada de forma natural com caudais de ventilação médios de 1,5 ren.h⁻¹ e 3,0 ren.h⁻¹. Quando se comparam os desempenhos da sala climatizada com os sistemas DOAS-CAV e DOAS-DCV a discussão assenta em resultados acumulados anuais de:

- percentagem de horas com temperatura acima de 26°C;
- desvio médio de temperatura (relativamente a 26°C) quando se excede os 26°C;
- percentagem de horas com temperatura abaixo de 20°C;
- desvio médio de temperatura (relativamente a 20°C) quando não se atinge os 20°C;
- percentagem de horas com concentrações de CO₂ acima de 900 ppm;
- desvio médio de concentração de CO₂ (relativamente a 900 ppm) quando se excede os 900 ppm;
- Consumo anual total, para aquecimento, arrefecimento e ventilação;
- Potência média, máxima e mínima anual para aquecimento, arrefecimento e ventilação.

Quando se compara o desempenho da sala climatizada com o sistema DOAS-DCV e a sala ventilada de modo natural a discussão assenta em resultados acumulados do tipo acima descrito, mas apenas para o período de aquecimento (de dezembro a fevereiro).

O presente documento termina com o capítulo 6 onde se apresentam as conclusões dos estudos efetuados e apontam temas para desenvolvimento futuro.

1.5. Interesse e contributos originais da tese

A climatização de salas de aula com sistemas DCV e controlo de CO₂ é um tema que desperta interesse face à relação que existe entre a QAI em salas de aula e o desempenho dos alunos (Wargocki, 2011a e Wargocki 2011b), e face ao potencial de poupança energética destes sistemas, quando comparados com sistemas convencionais. O atual contexto socioeconómico que promove a racionalização permanente dos gastos públicos, realça ainda mais a importância da temática abordada nesta tese.

Sob o ponto de vista científico, e a julgar pelo número de relatórios e artigos que abordam o estudo de sistemas de climatização DCV quer nos Estados Unidos da América, quer na Europa, este é um tema com inegável atualidade². Porque a modelação do comportamento térmico de edifícios climatizados constitui um tema complexo, e porque não existem ferramentas simplificadas que permitam a modelação do comportamento de sistemas DCV e controlo de CO₂, poderá observar-se alguma relutância por parte de projetistas e promotores nacionais em “arriscar” a implementação prática de um sistema menos ortodoxo com é o caso do DOAS-DCV. Com o presente trabalho pretende-se contribuir para o estudo e divulgação de sistemas DOAS-DCV em Portugal, modelando a sua aplicação a uma sala de aula tipo de uma escola nacional com arquitetura JCETS-MOP, sujeita a condições de utilização contemporâneas, ao clima nacional, e tendo em consideração as intervenções de reabilitação introduzidas pela Parque Escolar.

O presente documento é original nos seguintes aspetos:

- Identifica uma sala de aula tipo de um estabelecimento de ensino nacional (arquitetura JCETS-MOP) correspondente à situação pós intervenção da Parque escolar;
- Modela com o programa EnergyPlus um sistema de ventilação tipo DOAS-DCV (com controlo de CO₂);
- Compara sobre o ponto de vista da QAI, do conforto térmico e do consumo de energia, uma sala de aula tipo climatizada com os sistemas DOAS-DCV e DOAS-CAV; e a mesma sala de aula tipo com ventilação natural, concluindo-se vantagens e desvantagens do uso do sistema DOAS-DCV.

² Não se tem conhecimento de estudos desta natureza de autores nacionais ou aplicados a edifícios escolares nacionais.

Capítulo 2

Uma escola JCETS-MOP (pós reabilitação Parque Escolar)

Este capítulo introduz o conjunto edificado em estudo: a E.S. Gil Vicente pós reabilitação pela Parque Escolar. Caracteriza a sala de aula típica descrevendo a sua utilização e soluções construtivas genéricas. Descreve, ainda, o sistema de climatização DOAS-DCV como concebido pelo projetista de AVAC (Aquecimento Ventilação e Ar-Condicionado).

2.1. Conjunto edificado

A E.S. Gil Vicente, localizada na freguesia de São Vicente de Fora, integra-se num dos bairros mais antigos da cidade de Lisboa, o Bairro da Graça.

Inaugurado no ano de 1949, edifício da E.S. Gil Vicente possui uma arquitetura típica dos liceus do Estado Novo, sendo uma das 94 escolas construídas pelo Ministério das Obras Públicas no âmbito da Junta das Construções para o Ensino Técnico e Secundário (JCETS-MOP) (Parque Escolar, 2009). Encontrava-se originalmente dividida em dois corpos principais, um com dois pisos e outro com três. Os dois corpos principais do edifício, orientados segundo Este-Oeste, encontravam-se ligados por um corredor superior, orientado segundo Sul-Norte, sob o qual se situavam pátios cobertos que abriam para o exterior através de arcadas circulares.

Os edifícios da E.S. Gil Vicente foram alvo de duas intervenções parciais de manutenção e conservação nomeadamente nos anos sessenta e no princípio dos anos noventa.

Na Figura 2.1 apresenta-se a E.S. Gil Vicente, vista de satélite.

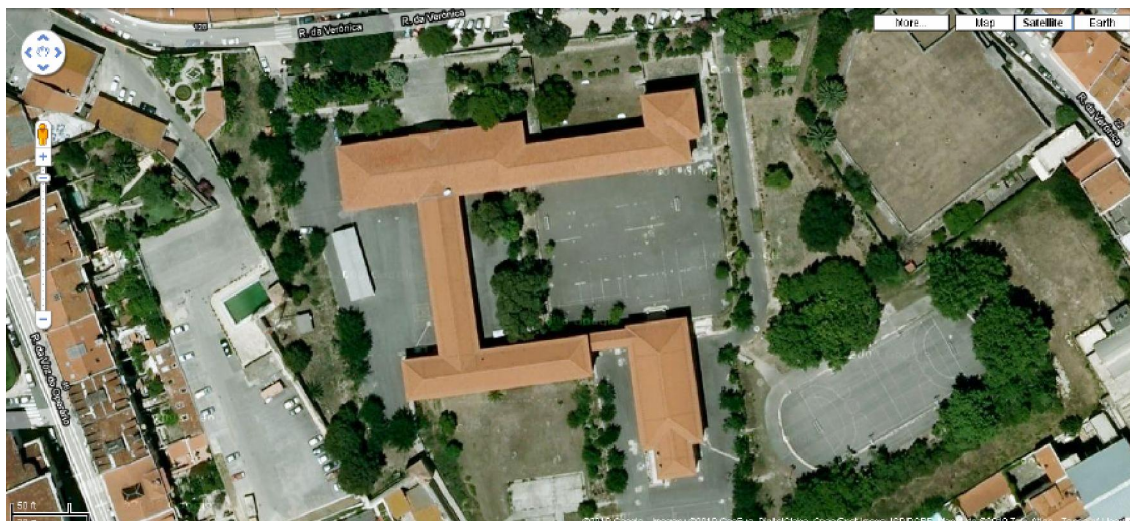


Figura 2.1 – Planta da E.S. Gil Vicente, vista de satélite.
(fonte: *GoogleEarth*, acedido em junho de 2011).

Na Figura 2.2 apresentam-se as fachadas Norte, Sul, Este e Oeste da E.S. Gil Vicente.



Vista das fachadas Norte



Vista das fachadas sul



Vista das fachadas Este



Vista das fachadas Oeste

Figura 2.2 – Fachadas Norte, Sul, Este e Oeste da E.S. Gil Vicente
(fonte: *GoogleEarth*, acedido em junho de 2011).

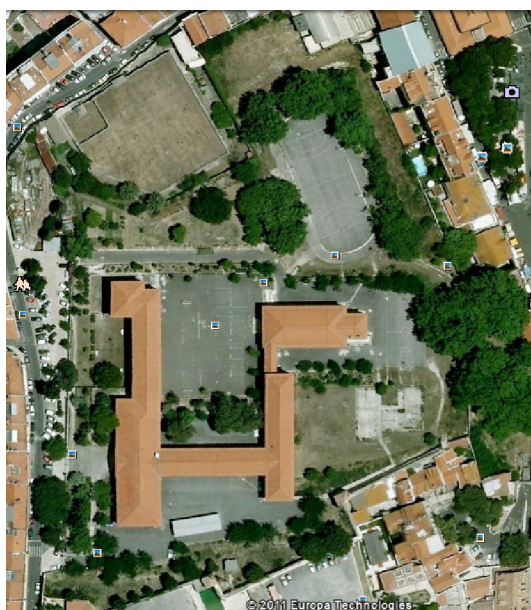
Após a intervenção efetuada pela Parque Escolar e de acordo com o arquiteto (Parque Escolar, 2011b):

“O edifício existente foi reorganizado, apostando na criação de um núcleo central na

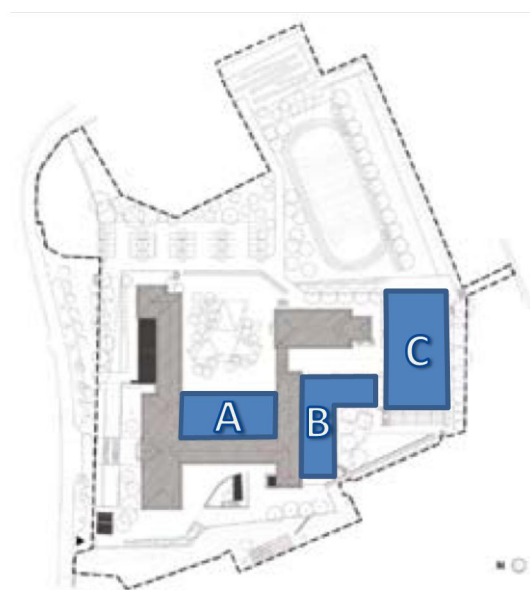
confluência da entrada principal onde se concentraram os espaços com maior intensidade de utilização coletiva - biblioteca, refeitório e áreas de apoio aos alunos - e as zonas vocacionadas para utilização pela comunidade exterior [elemento A representado na Figura 2.3 (b)]. Este núcleo funciona como interface entre os dois blocos letivos e articula-se com os espaços desportivos e recreativos.

A sul, implantada paralelamente ao edifício existente, foi construída uma nova ala, destinada à educação tecnológica e informática. Foi construído um novo volume, ortogonalmente ao anterior com dois pisos, onde se localiza uma sala de música e o espaço polivalente, bem como instalações de apoio às atividades desportivas [elemento B representado na Figura 2.3 (b)]. A construção de um polidesportivo exterior coberto na zona sul remata o conjunto [elemento C representado na Figura 2.3 (b)]".

Na Figura 2.3 apresenta-se a E.S. Gil Vicente: (a) antes da intervenção; (b) depois da intervenção pela Parque Escolar.



(a)



(b)

Figura 2.3 – Planta da E.S. Gil Vicente: (a) antes da intervenção; (b) depois da intervenção pela Parque Escolar.

A Figura 2.4 apresenta a intervenção efetuada pela Parque Escolar no núcleo central: (a) fachadas norte e este e (b) fachada sul.



(a)



(b)

Figura 2.4 – Núcleo central: (a) fachadas norte; (b) fachada sul depois da intervenção pela Parque Escolar.

O espaço interior do edifício é constituído por salas e gabinetes de trabalho destinados aos Serviços Administrativos, aos Órgãos de Gestão e Direção e aos Coordenadores/Delegados de Departamento, por salas de Professores, de Alunos e de Funcionários Auxiliares de Ação Educativa. Possui, ainda, um centro de recursos/biblioteca, salas destinadas aos serviços de reprografia e de papelaria, arrecadações e oficina, anfiteatro e pavilhão de teatro, ginásio (com balneários masculino e feminino), refeitório, cozinha e bufete.

Ainda no interior do edifício incluem-se salas de aula não específicas, salas de informática, laboratórios de Ciências Naturais e Biologia, laboratório de Física e outro de Química (com as respetivas salas de apoio), salas de Artes Visuais, sala de Educação Tecnológica, sala de Matemática, sala de Línguas, sala de História, sala de Geografia, sala de apoio à Educação Física.

No que concerne à comunidade educativa, a população discente da Escola Secundária de Gil Vicente é composta por cerca de 750 alunos com idades compreendidas entre os 11 e os 22 anos, distribuídos pelos últimos seis anos da escolaridade média - 3º ciclo do Ensino Básico (incluindo os Cursos de Educação e Formação) e do Ensino Secundário. Para além destes alunos, inclui-se ainda na população discente da escola os adultos que frequentam cursos extraescolares de Português para Estrangeiros, de Inglês para Atendimento e os diversos cursos S@ber+.

Por outro lado, a população docente, é constituída por 17 professores. A população não docente, num total de 43 elementos, inclui auxiliares de ação educativa, funcionários administrativos, funcionários da cozinha, guardas-noturnos, funcionários da cozinha, professores e psicóloga do serviço de Psicologia e Orientação e de Apoio aos alunos com Necessidades Educativas Especiais (E.S. Gil Vicente, 2010).

2.2. Sala de aula tipo (pós Parque Escolar)

As características das salas de aula da E.S. Gil Vicente variam de acordo com a utilização. Contudo, as salas de aula mais comuns possuem as seguintes características:

- Pé-direito: 3,0 m (aproximadamente);
- Área de pavimento: 50 m² (aproximadamente);
- Paredes exteriores com 0,5 m de espessura, *tout-venant*, sem isolamento térmico;
- Vãos envidraçados amplos e orientados a sul;
- Vãos envidraçados com caixilho metálico com corte térmico e vidro duplo incolor;
- Telas exteriores para controlo solar e de iluminação natural;
- Corredor a Norte;
- Porta de acesso ao corredor na parede interior Norte;
- Ocupação: 25 alunos (aproximadamente) + 1 professor;
- Calendário de ocupação: de 15 de setembro a 15 de junho das 7h00 (aproximadamente) às 18h00 (aproximadamente), todos os dias da semana com exceção dos feriados e de dois períodos de duas semanas no Natal e na Páscoa. As aulas são de 1,5 horas com intervalos de 15 minutos;
- Salas de aula pintadas de cores claras;
- Teto falso perfurado.

Na Figura 2.5 apresenta-se uma fotografia de uma sala de aula da E.S. Gil Vicente (E.S. Gil Vicente, 2010) e a configuração tipo para as salas de aula preconizada pela Parque Escolar (Parque Escolar, 2009).

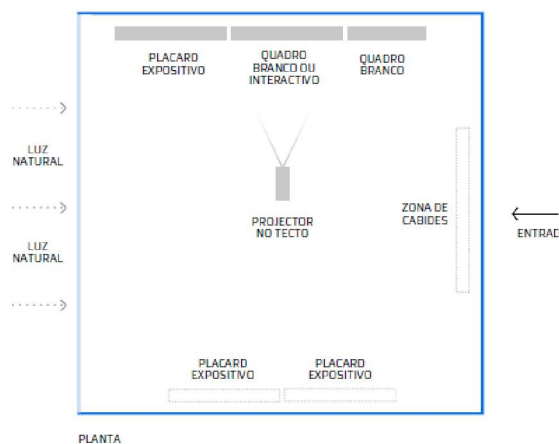


Figura 2.5 – Fotografia de sala de aula e configuração tipo de sala de aula preconizada pela Parque Escolar (2009).

As salas de aulas implementadas na E.S. Gil Vicente respeitam, genericamente, a configuração da sala tipo descrita em Parque Escolar (2009): O vão envidraçado está colocado à esquerda dos quadros, a zona dos quadros apresenta um *placard* expositivo, um quadro branco interativo e um quadro branco; vãos envidraçados amplos, fachada com janelas virada a sul, sala pintada com cores claras, teto falso acusticamente isolado e luminárias com lâmpadas fluorescentes e balastros eletrónicos.

Assente no exposto em Parque Escolar (2009) e no observado na E.S. Gil Vicente, neste trabalho estudou-se uma sala de aula tipo com as características preconizadas pela Parque Escolar (2009). Admite-se ser esta sala tipo representativa das salas de aula mais comuns na E.S. Gil Vicente e, presume-se, representativa das salas de aula de escolas JCETS-MOP reabilitadas pela Parque Escolar. A ausência de isolamento térmico nas paredes exteriores e a comunicação com o corredor que contacta o exterior são as características essenciais retidas da arquitetura JCETS-MOP.

A Figura 2.6 apresenta uma vista em perspetiva que aproxima a sala de aula tipo. Refira-se que as aberturas para ventilação representadas na fachada Sul da sala e na fachada Norte do corredor não foram consideradas. Também o número de aberturas entre sala e corredor está exagerado.

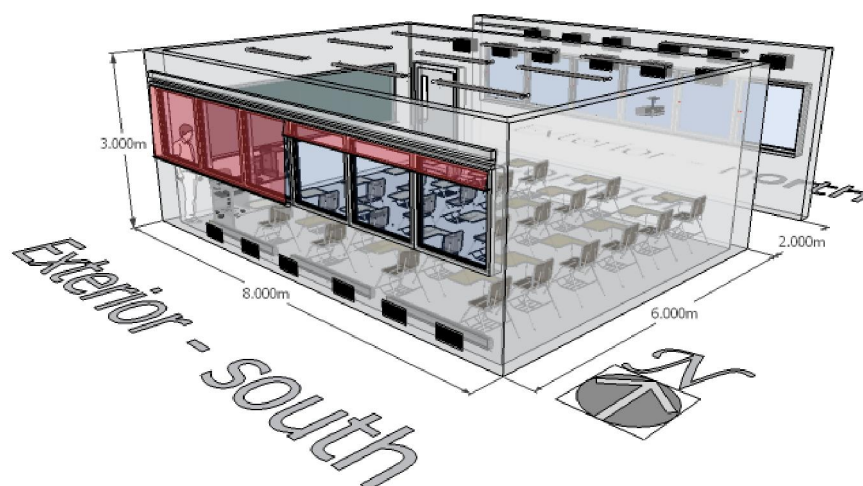


Figura 2.6 – Vista em perspetiva da sala estudada.

Para simplificar o estudo considera-se a sala tipo localizada num piso intermédio em posição central ao bloco a que pertence. Simplifica-se deste modo a modelação, já que as trocas de calor pelos elementos construtivos interiores – excetuando parede interior de separação com corredor – são desprezadas.

2.3. Sistema de climatização

Originalmente a E.S. Gil Vicente era ventilada naturalmente. Com a entrada em vigor do RSECE (2006), aquando da obra de reabilitação realizada pela Parque Escolar tornou-se obrigatório o cumprimento de requisitos mínimos em termos de QAI.

Na prática, a manutenção da QAI encontra-se associada à insuflação de valores mínimos de caudal de ar novo, valores estes definidos em *standards* internacionais como aqueles da ANSI/ASHRAE (2007), que estão na origem de muita legislação dos Estados Federados da América do Norte e inclusive, da Europa.

A Parque Escolar assumiu a obrigatoriedade regulamentar (como descrito no capítulo 1) e o projetista do sistema de AVAC da E.S. Gil Vicente procurou cumprir o regulamento nacional, tendo por essa razão recorrido a um sistema de climatização, já que a ventilação natural não garante caudais mínimos de ventilação.

Assim, todas as salas de aula dispõem de uma consola a todo o comprimento do paramento inferior da parede exterior. Esta consola insufla 100% de ar novo neutro vindo de uma UTAN. Esta insuflação ocorre a baixa velocidade tendo em vista a maximização da eficiência de ventilação nas salas. O ar das salas sai para o corredor através de aberturas francas colocadas na parede que separa sala e corredor – ver Figura 2.7. O ar do corredor é

extraído mecanicamente para o exterior via UTAN, onde existe um recuperador de calor.

Na Figura 2.7 apresenta-se o princípio de ventilação das salas de aula (situação de inverno).

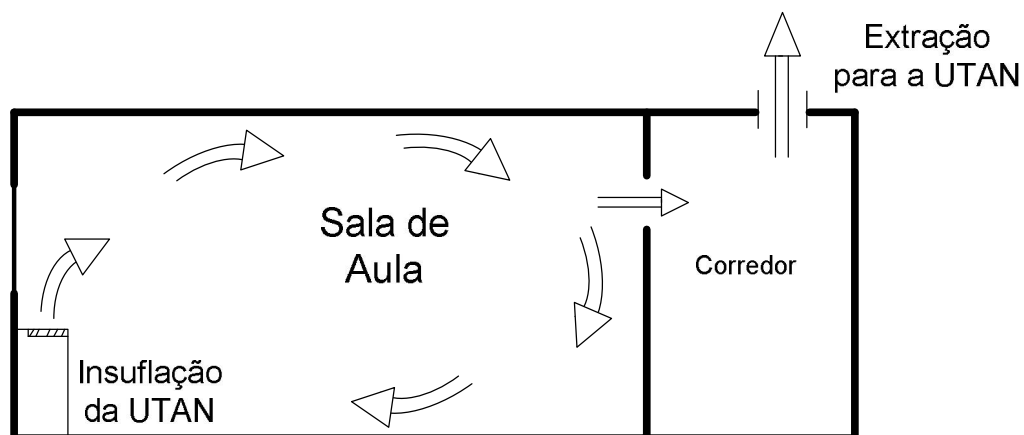


Figura 2.7 – Ventilação das salas de aula (situação de inverno).

Na Figura 2.8 apresenta-se o esquema de princípio da rede aerólca que serve as salas de aula.

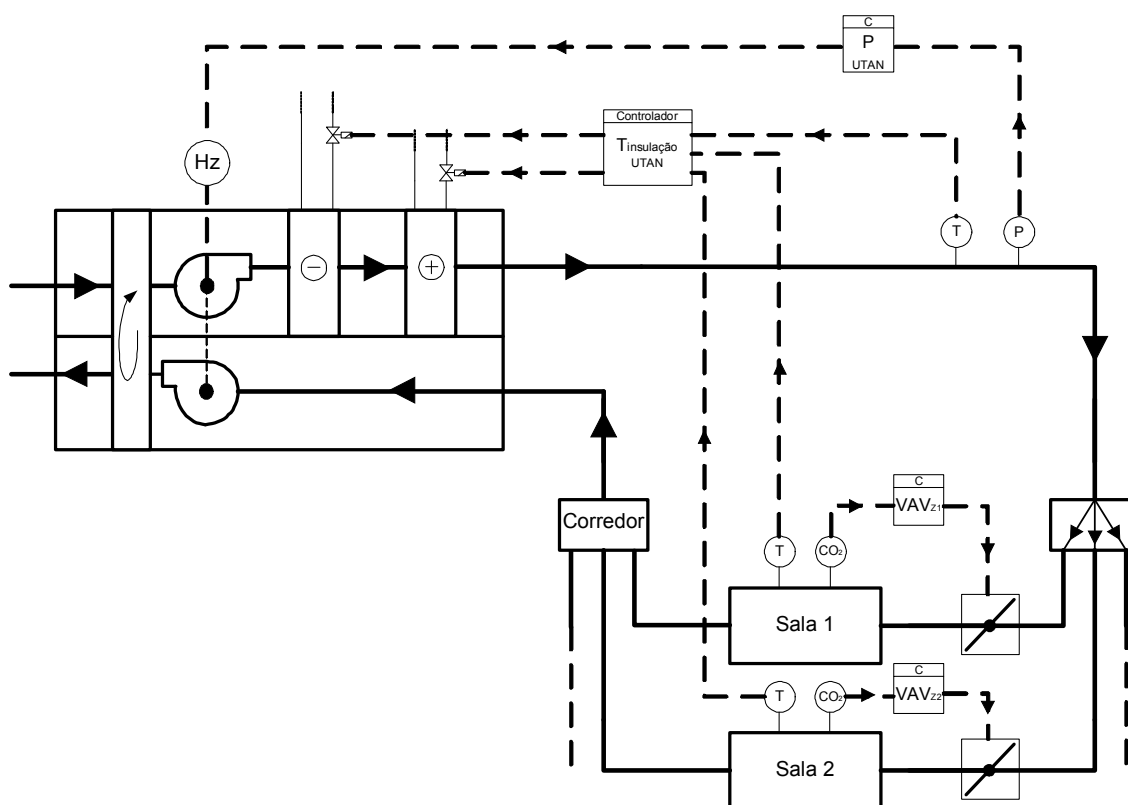


Figura 2.8 – Esquema de princípio da rede aerólca da E.S. Gil Vicente.

O trajeto do ar novo insuflado nas salas inclui uma etapa inicial em UTAN com recuperação de calor, seguida da neutralização das cargas térmicas do ar novo em baterias de arrefecimento e aquecimento. Registos motorizados (tantos quantos as salas de aula; localizados em zona técnica) permitem controlar o caudal de ar novo-neutro insuflado nas salas de aula. As velocidades dos ventiladores de insuflação e extração da UTAN são variáveis, função das necessidades de ar novo do conjunto de salas servido.

Trata-se de um sistema que assenta no controlo de caudal, função da concentração de CO₂ das salas. É o sensor de CO₂ localizado no interior da sala de aula que efetua o controlo do caudal de ar novo-neutro a ser insuflado; se a concentração de CO₂ numa sala é elevada, é enviado um sinal de abertura ao registo motorizado respetivo, aumentando o caudal de insuflação. Caso o sensor de CO₂ registe valores de concentração inferiores ao setpoint e o controlo determine que não é necessário a insuflação de ar novo da sala, o registo fecha. Assumindo que ao não existir um aumento de CO₂ na sala esta se encontra vazia, o sensor de CO₂ impossibilita o aquecimento/arrefecimento da sala. Com efeito, a autoridade da concentração de CO₂ nas salas é máxima. Só uma vez assegurada a manutenção das condições QAI na sala de aula – leia-se concentração de CO₂ – se pode prosseguir para o controlo as condições de temperatura ambiente.

O equilíbrio de pressões na rede aerólica assenta em ventiladores de velocidade variável de insuflação e de extração. A variação da velocidade do ventilador de insuflação é efetuada através de um pressostato localizado na conduta de insuflação à saída da UTAN. O pressostato é regulado para uma pressão máxima da rede aerólica, dando ordem ao variador de velocidade do ventilador para reduzir a velocidade sempre que essa pressão seja excedida. O ajuste da velocidade do ventilador de retorno é efetuado por ajuste direto à redução de velocidade do ventilador de insuflação, de forma a garantir equilíbrio entre as condutas de insuflação e extração.

A temperatura de insuflação do sistema é controlada por um termostato localizado na conduta de insuflação à saída da UTAN que dá informação ao controlador para abrir as válvulas da bateria de aquecimento/arrefecimento. Este termostato está parametrizado de acordo com um setpoint pré estabelecido, baseado nas temperaturas de conforto definidas no RCCTE (2006): 20°C para a estação de aquecimento e 25°C para a estação de arrefecimento.

A temperatura ambiente é controlada por um termostato localizado no interior da sala. O termostato rege-se por um setpoint pré estabelecido: 18°C na estação de aquecimento e 27°C na estação de arrefecimento. Com base na informação fornecida por este termostato o controlador pode proceder a ajustes no setpoint de temperatura de insuflação (acima de 20°C em aquecimento e abaixo de 25°C em arrefecimento) sempre que os valores de defeito não permitam assegurar o setpoint de temperatura ambiente na sala. A atuação do sistema depende das condições observadas no interior da sala mais desfavorável.

Capítulo 3

A Modelação

Este capítulo aborda a modelação numérica considerada. Descreve o programa EnergyPlus de modo sucinto; apresenta pressupostos de modelação da sala de aula tipo e de modelação dos sistemas de climatização DOAS-CAV e DOAS-DCV; apresenta as condições interiores de projeto. Uma análise das condições exteriores em Lisboa é apresentada no Anexo A.

3.1. Programa EnergyPlus

Para compreender a utilização de energia por parte de qualquer edifício torna-se crucial conhecer a quantidade de energia consumida e a forma como esta se distribui pelos vários consumidores. Apesar desta informação poder estar disponível, por exemplo, através de faturas de consumo de gás e de eletricidade, a avaliação da eficiência energética torna-se extremamente complexa face à reduzida desagregação das faturas. Por esta razão, surge cada vez mais a necessidade de desenvolver e usar ferramentas baseadas em métodos computacionais que simulam, detalhadamente, os fluxos de energia num edifício ao longo de períodos de tempo consideráveis, normalmente um ano.

Sob o ponto de vista térmico, um edifício constitui um sistema complexo formado por um conjunto mais ou menos vasto de subsistemas e dependente das condições climáticas, de equipamentos, da ocupação, dos sistemas de AVAC. O comportamento do sistema edifício/sala-de-aula, está portanto dependente de inúmeros fatores e o seu consumo energético não é estático nem previsível.

Para a análise destes sistemas recorre-se a vários métodos numéricos que resultam em programas de simulação térmica de edifícios. Estes programas permitem modelar e contemplar, da forma mais realista e pormenorizada possível, os fenómenos de transferência de energia que surgem num determinado edifício, sendo caracterizados matematicamente como um conjunto de sistemas de equações de conservação de massa e energia. A cada zona térmica correspondem várias destas equações atingindo-se com facilidade centenas de equações.

A precisão conseguida por estes programas resulta do carácter dinâmico, tornando possível o armazenamento e cálculo, no intervalo de tempo desejado, das variáveis com maior relevância, assim como a introdução de perfis de ocupação, diferentes tipos de atividades, parâmetros e tipos de controlo, diferentes sistemas de climatização, etc.

A simulação dinâmica dos fenómenos de transferência de energia apresenta, inúmeras vantagens, pois ao possibilitar estudos paramétricos associados ao edifício/sala-de-aula permite otimizar soluções que visam reduzir os consumos energéticos e aumentar a QAI.

O programa EnergyPlus é uma das ferramentas de simulação dinâmica disponíveis no mercado e consiste num programa computacional desenvolvido a partir dos programas BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e DOE-2, sendo disponibilizado gratuitamente pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE).

O EnergyPlus é um programa desenvolvido para efetuar a simulação de cargas térmicas e análise energética de edifícios e seus sistemas. Com base na descrição física do edifício e respetivos sistemas mecânicos associados, o EnergyPlus tem a capacidade de efetuar o cálculo das cargas térmicas de arrefecimento e aquecimento necessárias para manter as condições interiores do edifício de acordo com valores de *set-point* pré-estabelecidos pelo utilizador. Dados das condições de funcionamento da ventilação e cargas nas baterias de arrefecimento e aquecimento de todo o sistema secundário de AVAC, consumo de energia dos equipamentos primários (chillers, bombas de calor, etc.), assim como muitos outros detalhes da simulação, são igualmente fornecidos pelo programa.

Embora muitas das características de simulação tenham sido herdadas dos programas que o originaram, o EnergyPlus possui inúmeras qualidades que o distinguem dos outros programas de simulação, como por exemplo:

- Simulação integrada, efetuando uma solução simultânea em que a resposta às características construtivas do edifício e a resposta do sistema AVAC está acoplada (interagindo sempre que necessário).
- Intervalos de integração temporal definidos pelo utilizador, permitindo o cálculo para intervalos de tempo inferiores a uma hora, em interação entre as zonas térmicas e o ambiente; intervalos de tempo variáveis na interação entre a zona térmica e o sistema AVAC (variando automaticamente de modo a assegurar a estabilidade da solução).
- Inserção de ficheiros de texto ASCII com dados climáticos de *input/output*, que incluem condições ambientais horárias ou sub-horárias (até um quarto de hora) e produção de relatórios customizáveis pelo utilizador.
- Solução baseada na técnica de balanço de energia das cargas térmicas nos edifícios, que permite o cálculo simultâneo dos efeitos da radiação e convecção, tanto nas superfícies exteriores como interiores, durante cada intervalo de tempo.
- Determinação da condução de calor transiente através dos elementos do edifício como paredes, tetos, pavimentos, etc., através da utilização de funções transferência.

Desta forma, o programa EnergyPlus possui a capacidade de efetuar a simulação detalhada do edifício e sistemas associados, apresentando rigor na modelação, permitindo a possibilidade de cálculo de índices de conforto térmico e integração com outros sistemas

(fotovoltaico, aquecimento solar, etc.), e facilitando, ainda, os estudos de otimização energética nos edifícios.

O programa EnergyPlus tem como objetivo conseguir suportar a maioria das situações a que é submetido, quer no que respeita à caracterização física de edifícios quer nas variadas opções no projeto de sistemas AVAC. No entanto, nenhum programa é capaz de abranger todas as situações de simulação. Para conseguir abranger este vasto leque de situações o programa EnergyPlus permite a definição de funções que modelam comportamentos que não vêm definidos por defeito (*EMS custom control routines*³) e poderá funcionar de uma forma direta ou indiretamente através de *links* a outros programas e assim calcular as cargas térmicas e/ou consumo de energia para um determinado dia de projeto ou por um longo período de tempo (período de tempo que poderá ser superior a um ano) (EnergyPlus, 2010).

A Figura 3.1 apresenta de uma forma esquemática os módulos do programa EnergyPlus interações existentes.

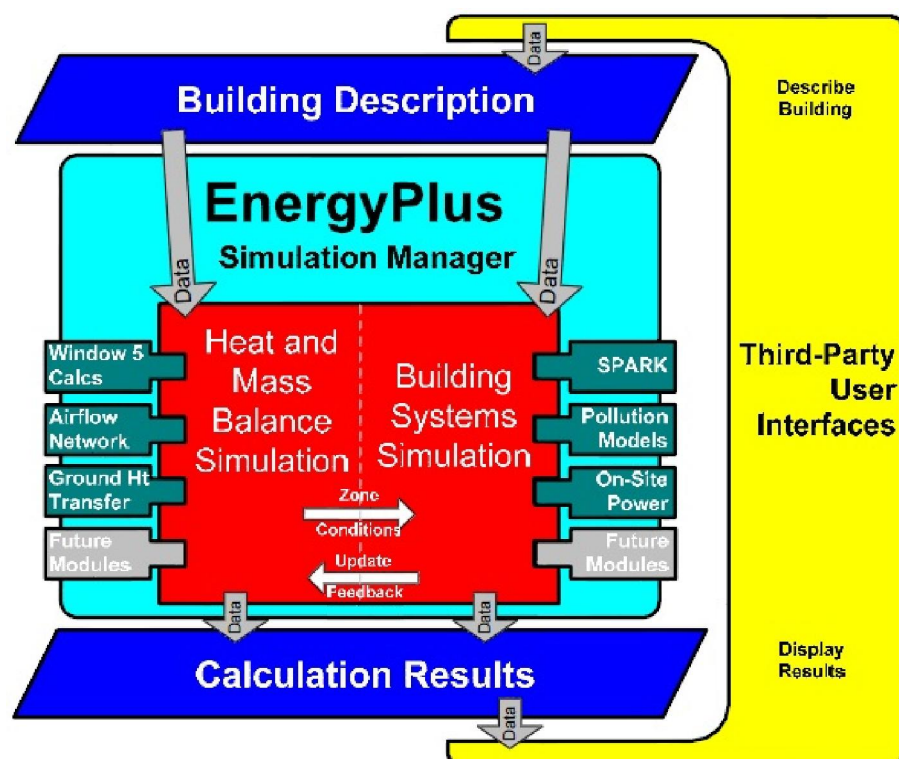


Figura 3.1 – Interações entre módulos do EnergyPlus.

³ Na modelação dos sistemas DOAS-CAV e DOAS-DCV recorreu-se a funções EMS (Energy Management System) (EnergyPlus, 2010).

3.2. Sala de aula tipo

A sala de aula modelada é a descrita na secção 2.2. Inclui-se na modelação o conjunto sala de aula corredor contíguo, uma vez que é esta a “célula independente” de modelação térmica mais simples – ver dimensões genéricas consideradas para este conjunto na Figura 2.6.

Quanto aos elementos da envolvente, as suas propriedades termofísicas são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características dos elementos construtivos da envolvente.

Tipo	Constituição equivalente (do exterior para o interior)	Propriedades Termofísicas
Parede Exterior Paredes em alvenaria tout-venant sem isolamento térmico	Reboco 1 cm Tijolo de 11 cm Reboco 1 cm	5,57 W/m ² .K
Parede interior em alvenaria de tijolo	Reboco 1 cm Tijolo de 7 cm Reboco 1 cm	4,99 W/m ² .K
Laje de teto (interior)	Betão com 20 cm Espaço de ar Proteção acústica (gesso cartonado 2 cm)	1,66 W/m ² .K
Laje de pavimento (interior)	Proteção acústica (gesso cartonado 2 cm) Espaço de ar Betão com 20 cm	1,66 W/m ² .K
Envidraçado Exterior	SGS Climalite 4:12:4	Espessura 0,018 Condutividade [W/m.K] 0,0522 Transmissividade solar na incidente normal 0,7 Transmissividade visível na incidente normal 0,81 Transmissividade de infravermelhos na incidente normal 0
Sombreamento	Tela exterior e cor clara	Emissividade 0,9 Transmissão térmica 0 Espessura [mm] 3 Condutividade [W/m.K] 0,1 Permeabilidade ao ar 0,1

No que concerne à utilização da sala de aula a Tabela 3.2 apresenta os ganhos internos considerados.

Tabela 3.2 – Ganhos internos na sala de aula.

Sala de Aula	Ganho específico
Ocupação (ganhos sensíveis e latentes)*	0,45 ocupante/m ² ; 86,25 W/ocupante
Iluminação	8,3 W/m ²
Equipamento (ganhos só sensíveis)	12,5 W/m ²

* Apesar de uma ocupação de 25 alunos e 1 professor, há que entrar em conta com os períodos de intervalo de 15 minutos a cada 1,5 h de aula, justificando-se a redução no ganho específico de ocupação.

No que diz respeito à ocupação a Tabela 3.3 apresenta o perfil de ocupação considerado.

Tabela 3.3 – Perfil de ocupação da sala de aula.

Horas	% Ocupação	
	Dias de Semana	Fins de semana, Feriados e Férias
0h às 1h	0	0
1h às 2h	0	0
2h às 3h	0	0
3h às 4h	0	0
4h às 5h	0	0
5h às 6h	0	0
6h às 7h	0	0
7h às 8h	1	0
8h às 9h	1	0
9h às 10h	1	0
10h às 11h	1	0
11h às 12h	1	0
12h às 13h	1	0
13h às 14h	0	0
14h às 15h	1	0
15h às 16h	1	0
16h às 17h	1	0
17h às 18h	1	0
18h às 19h	0	0
19h às 20h	0	0
20h às 21h	0	0
21h às 22h	0	0
22h às 23h	0	0
23h às 24h	0	0

Não se considerou a existência de sombreamentos fixos, na medida em que tal não acontece na E.S. Gil Vicente e, numa análise dos projetos de reabilitação da Parque Escolar, são diversos os casos em que o sombreamento é efetuado por dispositivos moveis, minimizando intervenções em fachadas de edifícios. Porém, admite-se a existência de telas de sombreamento móveis exteriores que têm como função controlo solar e controlo da

iluminância/encandeamento.

O fator determinante na operação de dispositivos de sombreamento em salas de aula é o controlo de encandeamento (contrastes entre zonas iluminadas / zonas sombreadas), algo que afeta a leitura no plano das secretárias e, sobretudo, no plano do quadro. Assim, na modelação da atuação dos dispositivos de sombreamento optou-se por um controlo assente no nível de encandeamento na proximidade do quadro.

Como o acionamento do sombreamento com o controlo de encandeamento aumenta o uso de iluminação artificial, dividiu-se o vão envidraçado em duas áreas permitindo o controlo independente do sombreamento em cada um dos vãos (EnergyPlus, 2011) – ver Figura 3.2.

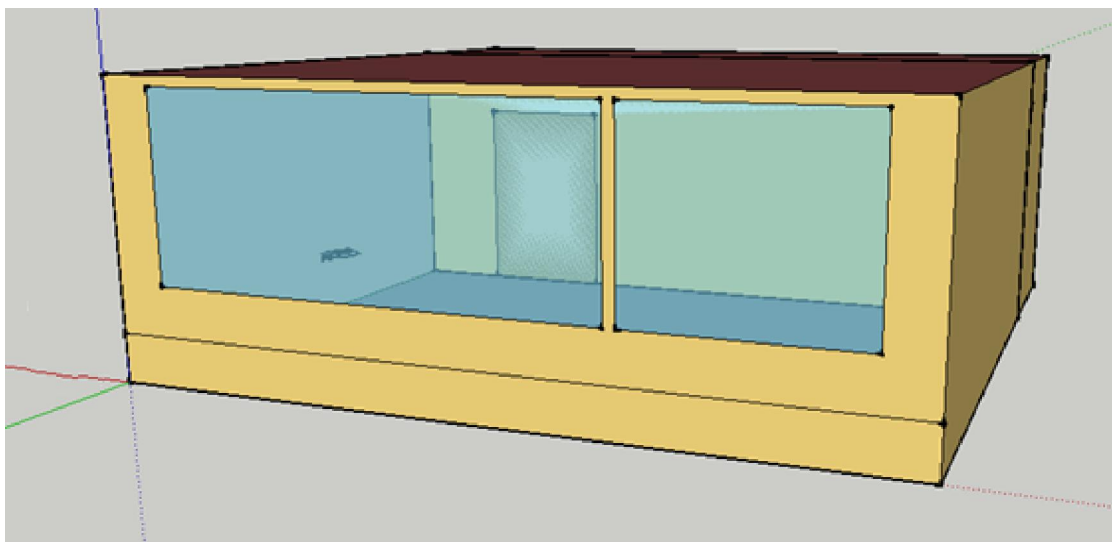


Figura 3.2 – Sala de aula com dois vãos envidraçados com controlo independente de sombreamento móvel exterior e ponto onde se mede a iluminância e nível de encandeamento, junto ao plano do quadro.

Na Figura 3.2 pode observar-se, no interior da sala, junto à parede do quadro (lado esquerdo), o ponto onde se mede a iluminância (útil para o controlo de iluminação artificial) e o nível de encandeamento (útil para o controlo do dispositivo de sombreamento).

O acionamento da iluminação artificial visa a manutenção de 300 lux (ver Tabela 3.9 da seção seguinte) e efetua-se em dois escalões, função do efeito da iluminação natural. Ou seja, sempre que a iluminação natural proporciona mais de 300 lux na sala a iluminação artificial é desligada. Quando a iluminação natural proporciona iluminâncias inferiores a 150 lux, a iluminação artificial é atuada a 100% (8,3 W/m², ver Tabela 3.2). A iluminação artificial é atuada a 50% nos restantes casos.

A esta ação de iluminação artificial da sala sobrepõe-se o calendário de ocupação da sala – ver Tabela 3.3 – que estabelece os períodos em que a iluminação artificial se encontra sempre desligada, independentemente das condições de iluminância.

No que diz respeito aos equipamentos, o perfil de utilização corresponde, também, ao perfil de ocupação.

O modelo de infiltração/ventilação natural considerado foi o descrito no manual do programa EnergyPlus como “modelo DOE2” (EnergyPlus, 2010b). Este modelo faz depender o caudal de infiltração/ventilação natural da velocidade do vento, atribuindo aos resultados um grau de aleatoriedade que se considerou importante.

No Anexo B analisam-se em detalhe as diferenças entre os modelos de infiltração/ventilação natural descritos no programa EnergyPlus.

Fruto da aleatoriedade da velocidade do vento apenas se definiram caudais médios anuais de infiltração/ventilação natural.

Sempre que se simularam sistemas de climatização admitiu-se uma redução de 75% dos caudais de infiltração/ventilação-natural – ver Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Perfil de infiltração/ventilação natural quando se modelam sistemas de climatização.

Horas	% Infiltrações	
	Dias de Semana	Fins de semana, Feriados e Férias
0h às 1h	1	1
1h às 2h	1	1
2h às 3h	1	1
3h às 4h	1	1
4h às 5h	1	1
5h às 6h	1	1
6h às 7h	1	1
7h às 8h	0,25	1
8h às 9h	0,25	1
9h às 10h	0,25	1
10h às 11h	0,25	1
11h às 12h	0,25	1
12h às 13h	0,25	1
13h às 14h	0,25	1
14h às 15h	0,25	1
15h às 16h	0,25	1
16h às 17h	0,25	1
17h às 18h	0,25	1
18h às 19h	1	1

19h às 20h	1	1
20h às 21h	1	1
21h às 22h	1	1
22h às 23h	1	1
23h às 24h	1	1

3.3. Condições interiores de projeto

Relativamente às condições interiores de projeto importa referir o que consta a norma EN15251 (2007). Esta norma define as categorias apresentadas na Tabela 3.5, sendo que as obras de renovação e construção nova da Parque Escolar se inserem na categoria II.

Tabela 3.5 – Categorias definidas na norma EN 15251 (2007).

Categoria	Definições
I	Nível elevado expectativa e é recomendado para espaços ocupados por pessoas muito sensíveis e frágeis, com requisitos especiais como deficiências, doentes, recém-nascidos e idosos.
II	Nível normal de expectativa e deve ser usado em edifícios novos ou remodelados.
III	Aceitável, nível de expectativa moderado e pode ser aplicado em edifícios existentes.
IV	Valores fora dos critérios acima descritos. Esta categoria só deverá ser utilizada para uma determinada parte do ano.

A norma define, ainda, para as várias categorias, parâmetros a usar no projeto e avaliação do desempenho energético de edifícios. Os parâmetros especificados são a qualidade do ar interior, o ambiente térmico, a iluminação e a acústica.

No que diz respeito à qualidade do ar interior, a Tabela 3.6 apresenta o especificado na norma. Refira-se que para o valor de concentração de CO₂ exterior pode-se considerar o valor de 400 ppm, resultando para a especificação de projeto de uma sala na categoria II concentrações máximas de CO₂ de 900 ppm⁴

⁴ O RSECE especifica 1800 mg/m³, ou seja, aproximadamente 1000 ppm.

Tabela 3.6 – Concentração de CO₂ a usar em projeto (EN 15251, 2007).

Categoria	Concentrações de CO ₂ em ppm acima das concentrações no ar exterior para cálculos energéticos
I	350
II	500
III	800
IV	<800

No que diz respeito ao ambiente térmico, a Tabela 3.7 e a Tabela 3.8 apresentam o especificado na norma sobre temperaturas de projeto e gama de variação de temperaturas admissível aquando do cálculo horário das cargas térmicas.

Tabela 3.7 – Temperaturas interiores de projeto para dimensionamento de edifícios e sistemas AVAC (EN 15251, 2007).

Tipo de edifício/espço	Categoria	Temperatura operativa °C Mínimo para o aquecimento (estação de aquecimento) – 1,0 clo	Temperatura operativa °C Mínimo para o arrefecimento (estação de arrefecimento) – 0,5 clo
Sala de aulas	I	21,0	25,0
	II	20,0	26,0
Sedentário ~ 1,2 met	III	19,0	27,0

Tabela 3.8 – Gama de temperaturas interiores admissíveis aquando do cálculo horário das cargas térmicas (EN 15251, 2007).

Tipo de edifício/espço	Categoria	Temperatura operativa °C Mínimo para o aquecimento (estação de aquecimento) – 1,0 clo	Temperatura operativa °C Mínimo para o arrefecimento (estação de arrefecimento) – 0,5 clo
Escritórios e espaços com atividade similar (escritórios, auditórios, cafetarias, restaurantes, salas de aula) Atividade Sedentária ~1,2 met	I	21,0 – 23,0	23,5 – 25,5
	II	20,0 – 24,0	23,0 – 26,0
	III	19,0 – 25,0	22,0 – 27,0

A título informativo, a norma EN 15251 (2007) apresenta também parâmetros de projeto relacionado com a iluminação – ver Tabela 3.9. Para além da iluminância no plano de trabalho especificam-se o índice de desconforto por encandeamento (UGR, norma EN 12464-1, 2002) e o índice de restituição de cor (Ra, norma EN 12464-1, 2002).

Tabela 3.9 – Parâmetros de projeto relativos a iluminação (EN 15251, 2007) – Apenas informativo.

Tipo de edifício	Espaço	Iluminância mantida, E_m , nas áreas de trabalho, lux	UGR	Ra	Observações
Edifícios de Educação	Sala de aulas	300	19	80	a 0,8 m
	Salas de aula para adultos	500	19	80	a 0,8 m
	Corredor	500	19	80	a 0,8 m

No presente trabalho seguiram-se as recomendações da norma EN 15251 (2007) e consideraram-se iluminâncias de 300 lux⁵. Relativamente ao índice de encandeamento, considerou-se o valor UGR de 19.

Não se impõem quaisquer especificações no domínio acústico visto não ser esse um dos objetivos do presente estudo.

3.4. Sistemas de climatização

Os sistemas de climatização considerados são do tipo DOAS.

Um sistema DOAS caracteriza-se por efetuar a separação entre a neutralização das cargas térmicas do ar exterior e a neutralização das cargas térmicas nos espaços. Muito popular em hotéis e edifícios residenciais multifamiliares, o sistema DOAS ganha agora popularidade em centros comerciais e muitas outras aplicações (ASHRAE, 2008). Este sistema introduz 100% de ar novo, aquece-o ou arrefece-o, pode humidifica-lo ou desumidifica-lo e filtra-o, fornecendo este ar tratado a cada espaço pretendido. O volume de ar é dimensionado de acordo com as exigências (*standards*) de caudais mínimos de ventilação, tal como especificado no RCESE ou em ASHRAE Standard 62.1. Como o sistema DOAS não é concebido para controlar a temperatura no interior de um determinado espaço, mas para fornece ar novo termicamente neutro, recorre-se (se pretendido) a um segundo sistema para assegurar a manutenção da temperatura ambiente desejada no espaço. Este segundo sistema é, então, o responsável pela compensação dos ganhos pela envolvente do edifício e ganhos internos.

Nos sistemas de climatização modelados não se considera a existência de sistemas para compensação de ganhos na sala-de-aula, apenas neutralização do ar novo. Com efeito, o sistema de climatização implementado na E.S. Gil Vicente, que serviu de inspiração a este trabalho, possui também esta característica.

⁵ Apesar do manual de projeto da Parque Escolar apontar para 500 lux.

Optou-se por comparar um sistema DOAS-DCV semelhante ao implementado na E.S. Gil Vicente, que possui variação de caudal por controlo de CO₂, com um sistema DOAS-CAV com caudal de insuflação constante.

A modelação de ambos os sistemas é apresentada nas secções seguintes.

3.4.1. DOAS-CAV

A Figura 3.3 apresenta o esquema de princípio da rede aerólica do sistema DOAS-CAV modelado.

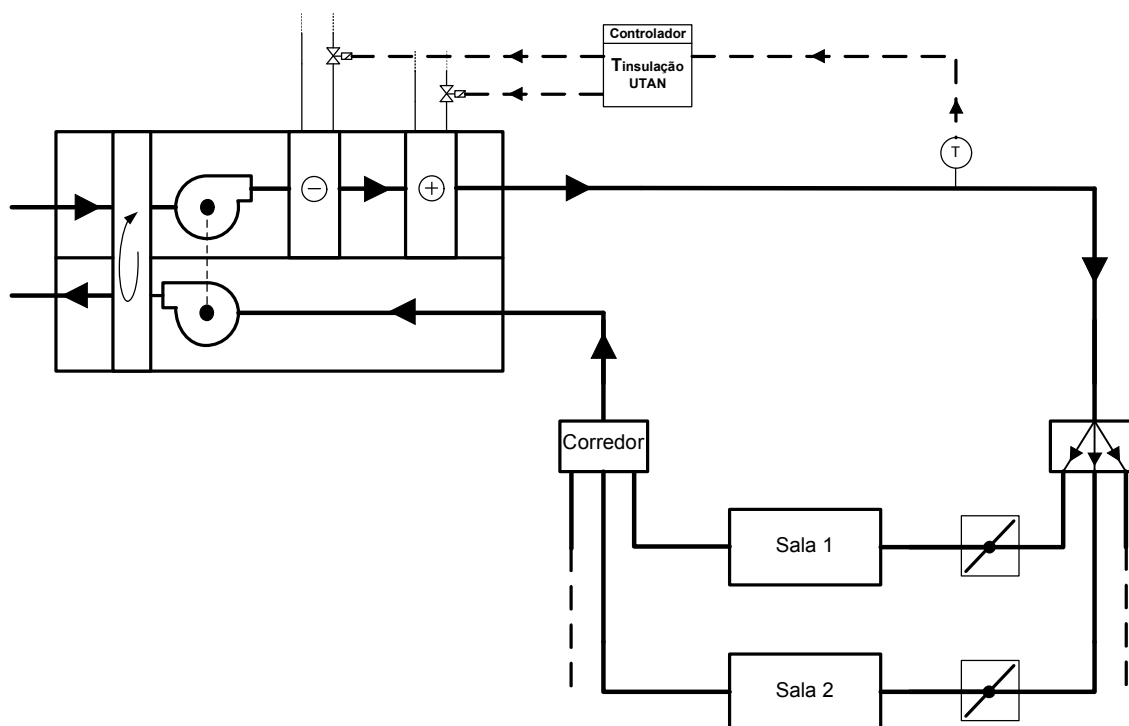


Figura 3.3 – Esquema de princípio da rede aerólica. Sistema DOAS-CAV.

O sistema consiste numa UTAN onde o ar novo insuflado começa por sofrer um pré tratamento através da passagem por um recuperador de calor, sendo encaminhado para as baterias de arrefecimento e aquecimento que concedem as características desejadas de temperatura de insuflação ao ar novo. O ar viciado sai da sala de aula por aberturas francas na parede para o corredor⁶, sendo daí encaminhado por um ventilador de extração para a UTAN, atravessando o recuperador de calor no trajeto para o exterior.

⁶ O corredor representa o plenum de extração do sistema de climatização.

A temperatura de insuflação do sistema é controlada por um termostato localizado na conduta de insuflação à saída da UTAN. A lei de controlo desta temperatura é:

$$\begin{cases} T_{ext} < 20^{\circ} C, & T_1 = 20^{\circ} C \\ 20^{\circ} C \leq T_{ext} \leq 23^{\circ} C, & T_1 = T_{ext} \\ T_{ext} > 23^{\circ} C, & T_1 = 23^{\circ} C \end{cases} \quad (1)$$

onde,

T_1 é a temperatura de insuflação, °C, e;

T_{ext} é a temperatura exterior, °C.

O limite superior de insuflação de ar novo a 23°C tem por objetivo evitar sobreaquecimentos.

Uma vez que a instalação está dotada de recuperação de calor para o ar novo⁷, sempre que a temperatura exterior está abaixo dos 20°C a recuperação de calor é acionada, preaquecendo-se o ar novo. Quando a temperatura do ar no plenum de extração é inferior à temperatura do ar exterior o recuperador de calor também é acionado prearrefecendo-se o ar novo.

Importa referir que sendo o plenum de extração o corredor adjacente à sala, que está em contacto com o exterior através de paredes e vãos envidraçados exteriores, a influência do ambiente exterior neste espaço não é desprezável. Ou seja, no sistema modelado podem observar-se diferenças importantes entre a temperatura do ar na sala e a temperatura do ar de extração que é conduzido ao recuperador de calor.

O caudal de ar insuflado (mecanicamente) na sala é constante das 7h00 às 18h00⁸, cumprindo com o mínimo exigido pelo RSECE (2006): 30 m³/h/ocupante⁹. Acrescem infiltrações / ventilação natural da ordem de 0,75 ren./h em período ocupado e 3 ren./h no resto do tempo.

3.4.2. DOAS-DCV

O sistema DOAS-DCV modelado tem por base o seguinte princípio: O RSECE (2006) prevê a possibilidade de insuflação de caudais inferiores a 30 m³/h/ocupante desde que se garanta a

⁷ Permitindo recuperação de calor sensível com eficiências de permuta de 81% e 76% a 75% e 100% do caudal de ar máximo, respetivamente (e em ambos os modos de aquecimento e arrefecimento).

⁸ Sem pausa no período de almoço.

⁹ Admite-se uma eficiência de ventilação do sistema de 1.

qualidade do ar interior. A qualidade do ar interior é habitualmente associada à concentração de CO₂ (que segundo o RSECE tem de ser inferior a 1000 ppm) pelo que, através do controlo do caudal de ventilação em função da manutenção do *setpoint* de CO₂ na sala, torna-se possível reduzir o consumo de energia sem comprometer o cumprimento do RSECE.

O esquema de princípio da rede aerólica do sistema DOAS-CAV modelado é idêntico ao apresentado na Figura 2.8 para o sistema implementado na E.S. Gil Vicente. Existem no entanto aspetos em que os sistemas diferem.

Relativamente à temperatura do ar de insuflação, esta é regida por uma lei de controlo como a descrita pela equação (1) para o sistema DOAS-CAV, com *setpoint* distintos dos considerados na E.S. Gil Vicente. Também o funcionamento do recuperador de calor obedece a critérios iguais aos estabelecidos na secção 3.4.1 para o sistema DOAS-CAV.

Uma outra diferença diz respeito ao controlo da temperatura ambiente na sala. Os *setpoints* utilizados são aqueles definidos na EN15215 (2007): 20°C em aquecimento e 26°C em arrefecimento. Além disso, apesar de se manter a autoridade do controlo de concentração de CO₂ na sala, o controlo não assenta na variação da temperatura do ar insuflado, mas na variação do caudal de ar insuflado. Esta diferença preserva o princípio de funcionamento do sistema projetado para a E.S. Gil Vicente desde que as salas de aula estejam ocupadas, como se considerará na obtenção dos resultados no capítulo 5.

A lei de controlo de caudal de ar insuflado (mecanicamente) pode ser descrita por¹⁰:

$$\begin{cases} \dot{V}(k+1) = \dot{V} \Big|_{\text{necessário para } \phi(k+1) < 900 \text{ ppm}} & \phi(k) > 900 \text{ ppm} \\ \dot{V}(k+1) = \dot{V} \Big|_{\text{necessário para } 20^\circ\text{C} < T(k+1) < 26^\circ\text{C}} & \phi(k) \leq 900 \text{ ppm} \end{cases} \quad (2)$$

onde $\dot{V}(k)$ é o caudal volúmico no instante k , expresso em m³/s, $\phi(k)$ é a concentração de CO₂ no instante k , expresso em ppm e $T(k)$ é a temperatura ambiente na sala no instante k expressa em °C. Acrescem infiltrações / ventilação natural da ordem de 0,75 ren./h em período ocupado e 3 ren./h no resto do tempo.

Relativamente a um controlo de temperatura ambiente assente na variação da temperatura do ar insuflado (como no projeto AVAC da E.S. Gil Vicente), o controlo de caudal implementado originará diferenças nos resultados de consumo de energia para ventilação e nos resultados de consumo de energia (e potência) para produção de água gelada e água quente nas baterias de arrefecimento e aquecimento, respetivamente. Quanto às condições de temperatura e de concentração de CO₂ na sala de aula, em geral¹¹ não existirão diferenças

¹⁰ Aplicável entre as 8h00 e as 18h00 sem pausa no período de almoço.

¹¹ Apenas quando os sistemas não possuem potência suficiente para vencer as cargas térmicas na sala se poderão registar diferenças. Contudo, como se verá no capítulo 5, situações deste tipo possuem expressão reduzida.

devido a considerar controlo de temperatura de insuflação ou controlo de caudal.

Apesar das diferenças no consumo de energia acima enunciadas, estima-se que em termos de consumo energético anual as diferenças entre ambas as implementações sejam esbatidas.

Capítulo 4

Validação da Modelação

Neste capítulo aborda-se a validação da modelação de uma sala de aula e dos diferentes sistemas de climatização com o programa EnergyPlus.

4.1. Comportamento da sala de aula

A modelação numérica do comportamento térmico de edifícios deve ser acompanhada de estudos prévios de validação. Idealmente, esta validação é feita por comparação com resultados de monitorização do sistema modelado. Não sendo isto possível, pode recorrer-se à modelação de sistemas *standard* como aqueles usados no programa BESTEST (Neymark, 2001) de validação de ferramentas BES (Building Energy Simulation).

No presente estudo não foi possível obter dados de monitorização de salas de aula. A validação prévia por modelação de sistemas BESTEST não foi também contemplada. Optou-se por uma validação assente na experiência subjetiva do comportamento de salas de aula na E.S. Gil Vicente¹² e na comparação com resultados de concentração de CO₂ apresentados em artigos científicos.

Estudos preliminares permitiram concluir que o efeito da radiação solar (elevada, em Lisboa – ver Anexo A) e das infiltrações afeta significativamente o comportamento térmico de salas de aula. A modelação (da ativação) de dispositivos de sombreamento móveis e da infiltração / ventilação natural (abertura e fecho de janelas) é fundamental para a obtenção de resultados numéricos credíveis de temperatura no interior de salas de aula. Uma vez que o estudo de modelos de ativação de dispositivos de sombreamento e de modelos de infiltração / ventilação natural é um tema que está para além do objetivo do presente trabalho¹³, optou-se por validar o comportamento térmico da sala de aula apenas no período de aquecimento; e, para uma sala orientada a Norte, já que para evitar desconforto nos meses de inverno, as janelas permanecem normalmente fechadas e na orientação Norte os dispositivos de sombreamento permanecem em geral desativados. Além disto minimiza-se o “ruído” introduzido por elevados ganhos de calor através de vãos envidraçados.

As diferenças pertinentes para efeitos de modelação térmica entre a sala de aula usada

¹² O orientador desta tese foi aluno na E.S. Gil Vicente entre 1982 e 1986.

¹³ Ver, por exemplo, Nicol (2001).

para validação (doravante designada “sala de aula de validação”) e a sala de aula tipo reabilitada pela Parque Escolar, apresentada na secção 2.2, são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Diferenças entre sala de aula tipo reabilitada e sala de aula de validação.

Sala de aula de validação	Sala de aula tipo reabilitada (ver secção 2.2)
Orientação Norte	Orientação Sul
Vidro exterior incolor simples de 3 mm	Vidro exterior incolor SGG Climatlit 4.12.4
Sem ganhos internos devido a equipamentos	Ganhos internos devidos a equipamentos de 12,5 W/m ² (sensíveis)

O período de aquecimento usado – de dezembro a fevereiro – assentou na análise dos dados contidos no ficheiro TRY de Lisboa (INETI, 2005). O Anexo A detalha esta análise.

A Tabela 4.2 resume resultados de comportamento da sala de aula de validação quando se introduzem, sequencialmente, diferentes modelos no programa EnergyPlus. Estes resultados são comparados com aqueles para o ambiente exterior. Nesta tabela define-se:

- Modelo Base: modelo da sala de aula sem ganhos internos, sem modelos de sombreamento, iluminação artificial e infiltração;
- Modelo A: modelo base acrescido de modelo de (i) sombreamento com controlo de ativação (abertura/fecho) de telas sombreadoras exteriores em função do fator de encandeamento e (ii) modelo de iluminação artificial com controlo de acionamento de dois setores de iluminação (próximo e afastado da fachada) em função da iluminância interior;
- Modelo B, modelo A acrescido de ocupação e infiltração / ventilação natural.

O modelo B subdivide-se em três; B1, B2 e B3, com caudais de ventilação nulo, com média de 1,5 renovações por hora e com média de 3 renovações por hora, respetivamente.

Tabela 4.2 – Resultados dos estudos de validação da modelação numérica da sala de aula de validação. Período entre dezembro e fevereiro, dias úteis do calendário escolar das 7h00 às 18h00, num total de 520 h.

		Ambiente Exterior	Ambiente Interior - Sala NORTE				
			Base Envolvente	A Envolvente Sombream. Illum. Nat. & Artif.	B1 Envolvente Sombream. Illum. Nat. & Artif. Ocupação Vent. Nat. = 0h ⁻¹	B2 Envolvente Sombream. Illum. Nat. & Artif. Ocupação Vent. Nat. = 1,5h ⁻¹	B3 Envolvente Sombream. Illum. Nat. & Artif. Ocupação Vent. Nat. = 3h ⁻¹
Vent. Natural [ren./h]	Média	-	0,0	0,0	0,0	1,5	3,0
	Desv. Padrão	-	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0
	Máx.	-	-	-	-	3,0	6,0
	Min.	-	-	-	-	0,0	0,0
Temperatura	Média [°C]	12,0	17,6	18,4	24,0	18,7	16,9
	Desv. Padrão [°C]	2,7	1,9	1,7	2,1	2,0	2,1
	Máx. [°C]	18,7	22,6	22,7	29,4	23,8	22,0
	Min. [°C]	4,2	12,5	13,2	17,2	11,2	9,2
	h com T _{int} <20°C [%]	100,0	89,0	83,1	3,8	74,2	91,5
	h com T _{int} >26°C [%]	0,0	0,0	0,0	17,1	0,0	0,0
	Desvio qd T _{int} <20°C [°C]	-8,0	-2,8	-2,2	-0,9	-2,2	-3,4
	Desvio qd T _{int} >26°C [°C]	-	-	-	1,0	-	-
Concentração de CO ₂	Média [ppm]	400,0	400,0	400,0	-	1377,6	948,0
	Desv. Padrão [ppm]	0,0	0,0	0,0	-	605,3	458,6
	Máx. [ppm]	-	-	-	-	7036,5	6283,6
	Min. [ppm]	-	-	-	-	696,7	587,8
	h com CO ₂ >900ppm [%]	0,0	0,0	0,0	100,0	87,1	43,1
	Desvio qd CO ₂ >900ppm [ppm]	0,0	-	-	-	563,5	269,4

A comparação entre os resultados assenta nas estatísticas valor médio e desvio padrão, nos valores máximo e mínimo e ainda nos parâmetros percentagem de horas com uma determinada ocorrência em temperatura ou concentração de CO₂ e desvio médio quando se ultrapassa uma condição imposta em temperatura ou concentração de CO₂.

Percentagem de horas com temperatura interior inferior a 20°C, superior a 26°C ou de concentração de CO₂ superior a 900 ppm, define o número de horas em que a temperatura interior na sala de aula esteve abaixo de 20°C, acima de 26°C e em que a concentração de CO₂ esteve acima de 900 ppm, respetivamente, face ao número de horas em que a sala esteve ocupada.

Por exemplo, na definição de percentagem de horas com temperatura interior inferior a 20°C usa-se a expressão

$$\frac{\sum_{i=1}^n H(20 - T_{\text{int},i})}{n}, \quad (3)$$

sendo $T_{\text{int},i}$ o valor da temperatura interior na hora i , que varia entre 1 e n , e $H(x)$ a função de Heaviside (contínua à esquerda),

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Desvio médio quando se ultrapassa uma condição imposta de temperatura ou de concentração de CO₂ na sala é determinado a partir de uma expressão como aquela abaixo, aplicável à situação em que se verificam temperaturas interiores inferiores a 20°C (situação de aquecimento).

$$\frac{\sum_{i=1}^n (T_{\text{int},i} - 20)H(20 - T_{\text{int},i})}{\sum_{i=1}^n H(20 - T_{\text{int},i})} . \quad (5)$$

Os resultados da Tabela 4.2 permitem concluir o seguinte:

- No período simulado as temperaturas exteriores são sempre inferiores a 20°C, havendo sempre necessidade de aquecimento (no exterior).

- A existência de uma envolvente (sem sombreamento, ganhos internos e infiltração) – modelo Base – reduz significativamente as necessidades de aquecimento.

- Face ao modelo Base, a introdução do modelo de sombreamento pouco afeta o comportamento térmico da sala. Isto era esperado (e desejado) numa sala orientada a Norte no período de inverno. A melhoria das condições interiores ocorrida com o modelo A (face ao modelo Base) decorre também dos ganhos de calor de iluminação artificial.

- Os ganhos de calor por ocupação introduzem alterações muito significativas no comportamento térmico da sala, passando esta a necessitar de arrefecimento – ver modelo B1.

- Não se devem modelar taxas de ventilação demasiado reduzidas pois tal dá origem a resultados de concentração de CO₂ na sala irrealistas – ver modelos Bi com i=1,2,3.

- Renovações do ar médias na sala da ordem de 1,5 h⁻¹ originam salas com qualidade do ar deficiente (concentrações de CO₂ médias superiores em 50%, aproximadamente, ao limite de 900 ppm). Aumentando este valor para 3 h⁻¹ conseguem-se concentrações de CO₂ na sala, em média, inferiores a 1000 ppm; porém, observam-se reduções significativas das temperaturas interiores, tornando-se a sala de aula fria.

Os resultados de temperatura no interior da sala obtidos por modelação com o programa EnergyPlus – modelos B2 e B3 – apontam para um modelação realista, com ambientes térmicos frios na estação de aquecimento.

Este é o resultado esperado para uma sala de aula não reabilitada (recordar Tabela 4.1) orientada a Norte, no período de aquecimento.

Comparando os resultados de concentração de CO₂ obtidos por modelação com aqueles apresentados por Santamouris (2008), não se observam disparidades, concluindo-se que os valores (médios) da ordem de 1400 ppm em salas ventiladas naturalmente são realistas e estão em consonância com valores típicos observados em escolas da região mediterrânica.

4.2. Comportamento dos sistemas de climatização

Modelou-se com o programa EnergyPlus a sala de aula de validação – modelo B da secção anterior – com os dois sistemas DOAS descritos na secção 2.3.

Como a análise que se fez do ficheiro climático TRY de Lisboa – ver Anexo A – permite concluir que no período entre setembro e dezembro se observam condições exteriores típicas de verão (setembro), estação intermédia (outubro e novembro) e inverno (dezembro), foi neste período de 4 meses que se procuraram as situações extremas de necessidades de aquecimento e de necessidades de arrefecimento e se analisou o comportamento dos sistemas modelados (UTAN, Recuperador de Calor), quanto a caudais insuflados e à observância de leis de controlo.

Uma vez que o propósito da presente secção é a validação da modelação dos sistemas de climatização, ao modelo B da secção anterior sobreposaram-se caudais de infiltração / ventilação natural constantes e iguais a 0,75 renovação por hora nos períodos em que a sala se encontra ocupada e com ventilação mecânica ativada¹⁴, e 3,0 renovações por hora no restante tempo.

Admitiu-se um setpoint (valor de ajuste) de temperatura ambiente fixo na sala de 23°C, aceitando-se desvios (de controlo) de ± 3 K. Ou seja, a temperatura na sala pode variar entre 20°C e 26°C. Sempre que a temperatura na sala é inferior a 20°C, aquece-se o ar novo. Sempre que a temperatura na sala é superior a 26°C, arrefece-se o ar novo – recordar Equação (1).

4.2.1. DOAS-CAV

Porque o princípio subjacente a este sistema é unicamente obedecer à regulamentação nacional em vigor o caudal de ventilação foi fixado tendo em consideração a ocupação e o valor de 30 m³/h/pessoa (RSECE, 2006¹⁵). Atendendo ao número de ocupantes por sala (25+1), admitiu-se um caudal constante de 0,217 m³/s de ar novo.

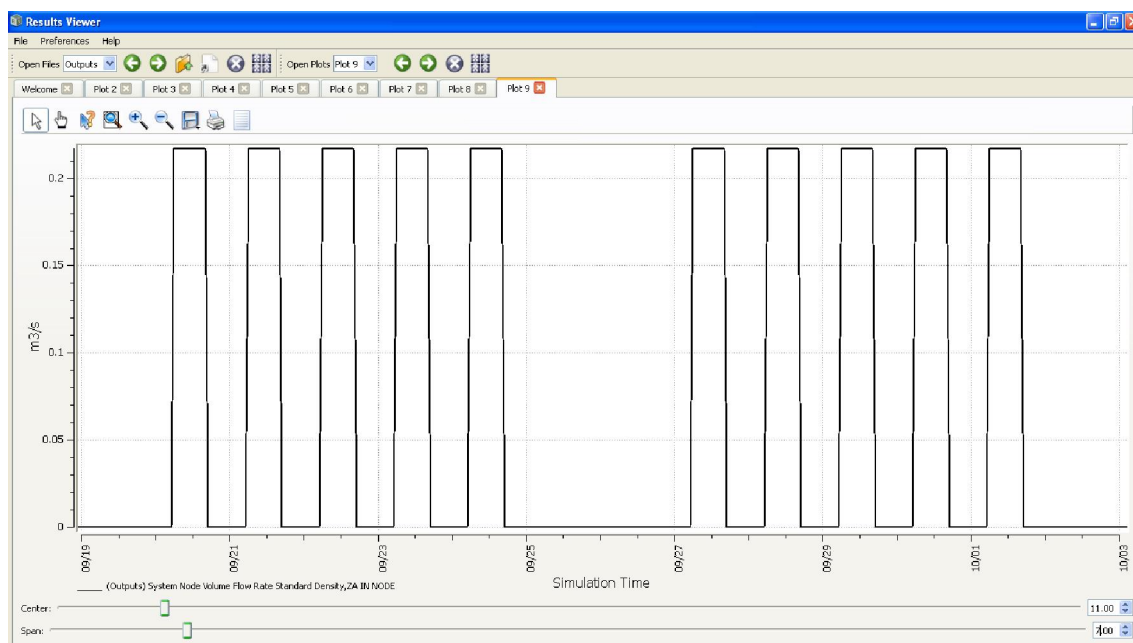
Com base no descrito na secção 3.4.1 a validação do sistema DOAS-CAV deve assentar na:

- Verificação de caudal constante (dias úteis das 7h00 às 18h00);
- Verificação do funcionamento do recuperador de calor como descrito na secção 3.4.1;
- Verificação da lei de controlo da temperatura de insuflação – Equação (1).

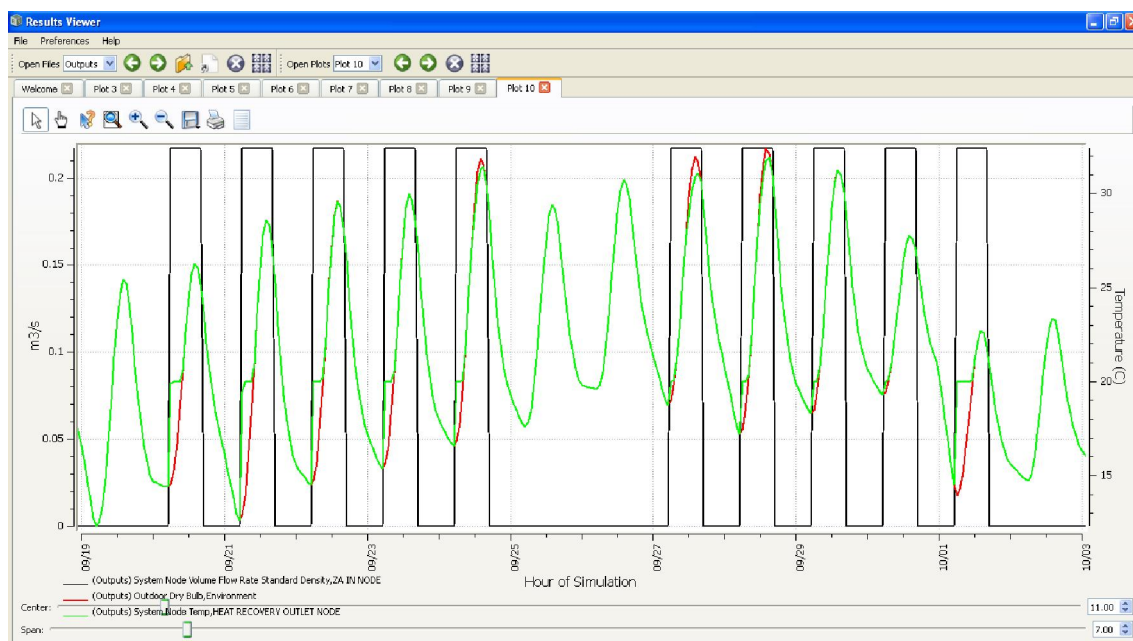
A Figura 4.1 apresenta resultados de validação do comportamento do sistema DOAS-CAV.

¹⁴ Das 7h00 às 18h00 sem interrupção para almoço.

¹⁵ Admitiu-se uma eficiência de ventilação do sistema de 1.



a) Caudal de ar novo insuflado.



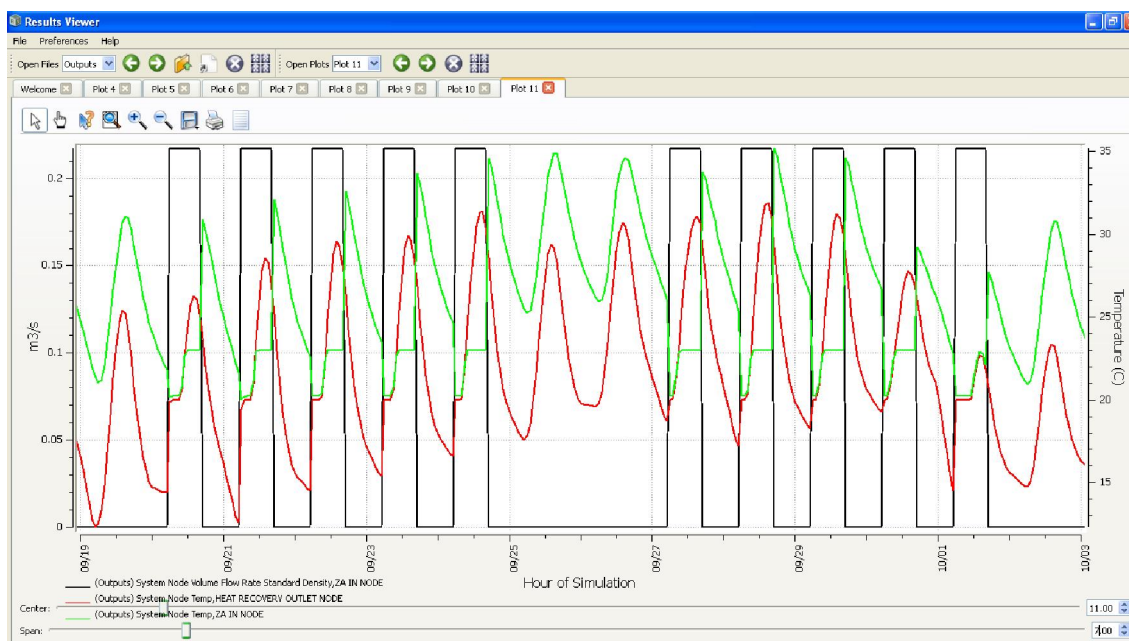
b) Comportamento do recuperador de calor.

Legenda:

Linha preta: Caudal de ar novo insuflado;

Linha vermelha: Temperatura exterior;

Linha verde: Temperatura de ar à entrada da UTAN (saída do recuperador de calor).



c) Comportamento da UTAN.

Legenda:

Linha preta: Caudal de ar novo insuflado;

Linha vermelha: Temperatura de ar à entrada da UTAN (saída do recuperador de calor);

Linha verde: Temperatura de ar à saída da UTAN (insuflação na sala de aula).

Figura 4.1 – Validação do sistema DOAS-CAV.

A Figura 4.1 permite chegar às seguintes conclusões:

- O caudal constante definido é insuflado no período desejado¹⁶ – ver Figura 4.1 a).
- O funcionamento do recuperador de calor é o esperado – ver Figura 4.1 b). Quando a temperatura exterior é inferior a 20°C o recuperador de calor é acionado e se o balanço térmico permitir 100% de ar novo é aquecido até 20°C – ver semana de 20 a 24 de setembro e em particular o dia 1 de outubro. Quando a temperatura do ar rejeitado para o exterior pelo recuperador de calor é inferior à temperatura exterior o recuperador de calor é acionado – ver períodos da tarde dos dias 24, 27 e 28 de setembro.
- A regra de controlo definida pela Equação (1) é respeitada – ver Figura 4.1 c). Não se insufla ar na sala a temperaturas abaixo de 20°C e acima de 23°C. *Note-se que no gráfico se apresentam valores de temperatura de insuflação – linha verde – quando a ventilação se encontra desligada (depois das 18h e antes das 7h). Esses valores (gerados numericamente pelo programa EnergyPlus) não possuem significado físico e devem ser desprezados.*

¹⁶ Ao valor de caudal insuflado pelo sistema de climatização acresce 0,75 ren./h em período de ocupação devido a infiltração / ventilação natural. No restante tempo a infiltração / ventilação natural é 3 ren./h

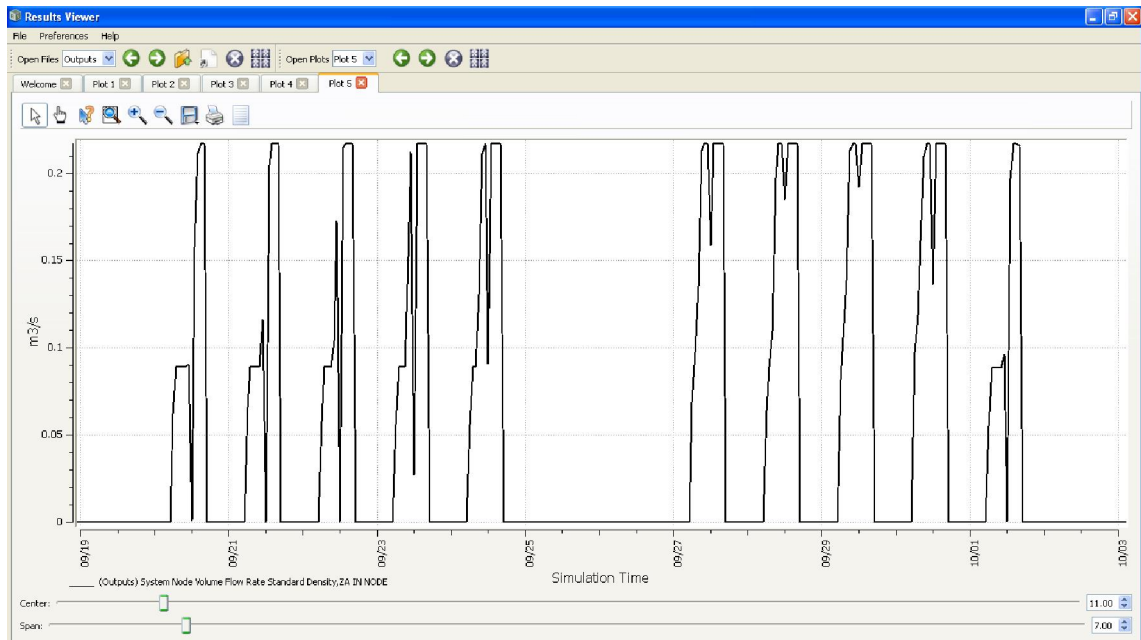
4.2.2. DOAS-DCV

Implementou-se o sistema DCV com 100% de ar novo e controlo de CO₂ descrito na secção 3.4.2, tendo-se definido um caudal de insuflação máximo de 0,217 m³/s, o valor usado no sistema DOAS-CAV.

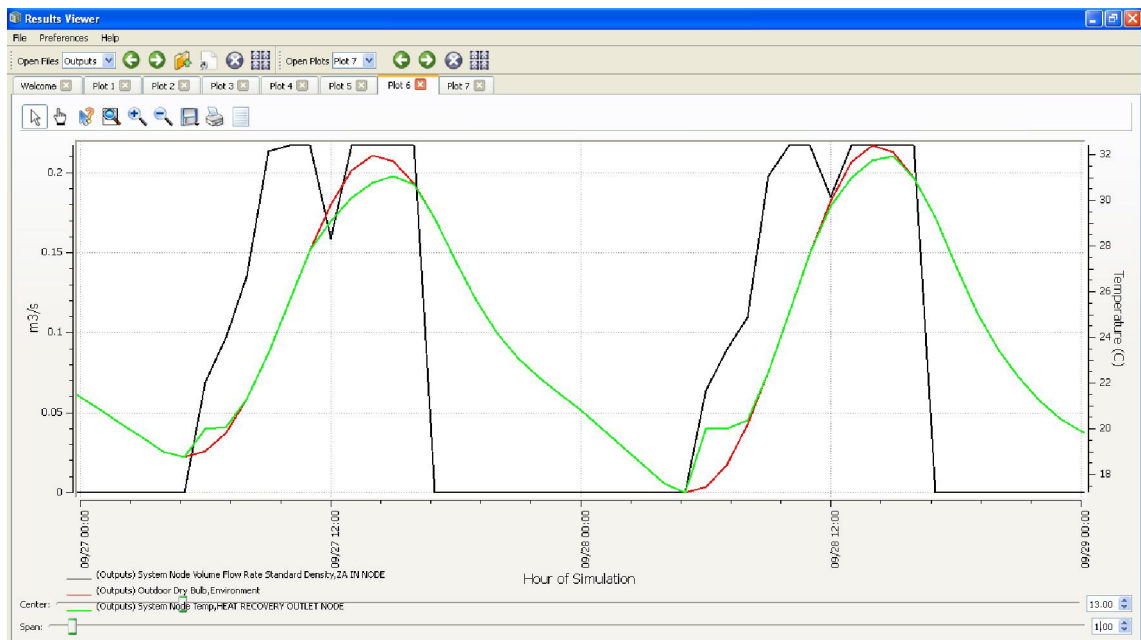
Com base no descrito na secção 3.4.2 a validação do sistema DOAS-DCV deve assentar na:

- Verificação de caudal variável (dias úteis das 7h00 às 18h00);
- Verificação do funcionamento do recuperador de calor como descrito na secção 3.4.1;
- Verificação da lei de controlo da temperatura de insuflação – Equação (1);
- Verificação de concentrações de CO₂ na sala inferiores ao valor especificado (900 ppm).

A Figura 4.2 apresenta resultados de validação do comportamento do sistema DOAS-DCV.



a) Caudal de ar novo insuflado.



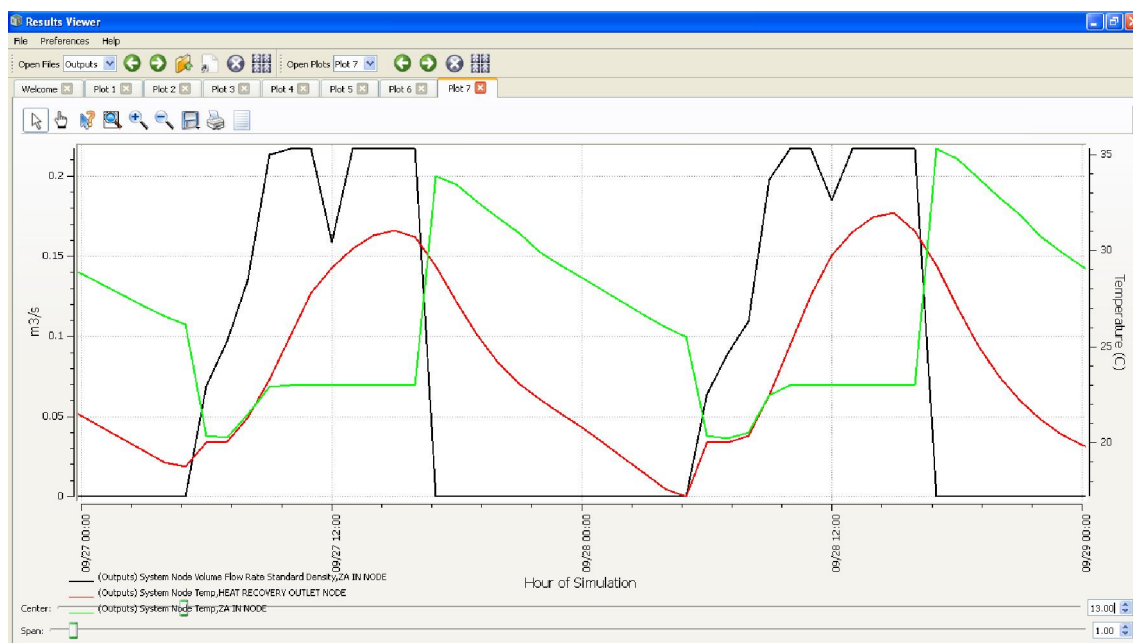
b) Comportamento do recuperador de calor.

Legenda:

Linha preta: Caudal de ar novo insuflado;

Linha vermelha: Temperatura exterior;

Linha verde: Temperatura de ar à entrada da UTAN (saída do recuperador de calor).



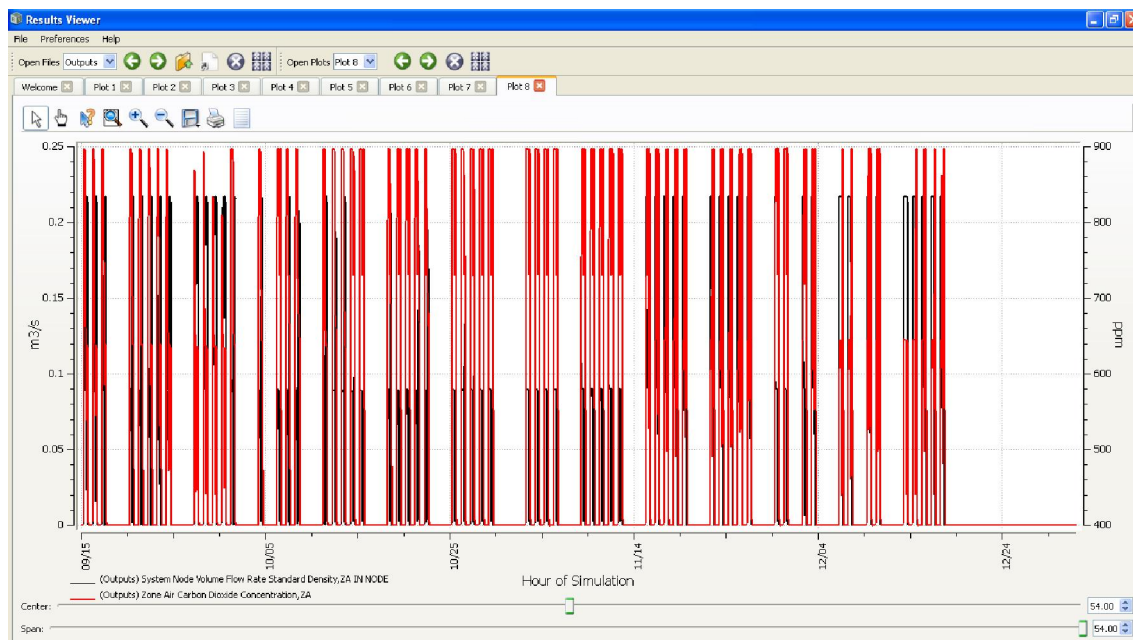
c) Comportamento da UTAN.

Legenda:

Linha preta: Caudal de ar novo insuflado;

Linha vermelha: Temperatura de ar à entrada da UTAN (saída do recuperador de calor);

Linha verde: Temperatura de ar à saída da UTAN (insuflação na sala de aula).

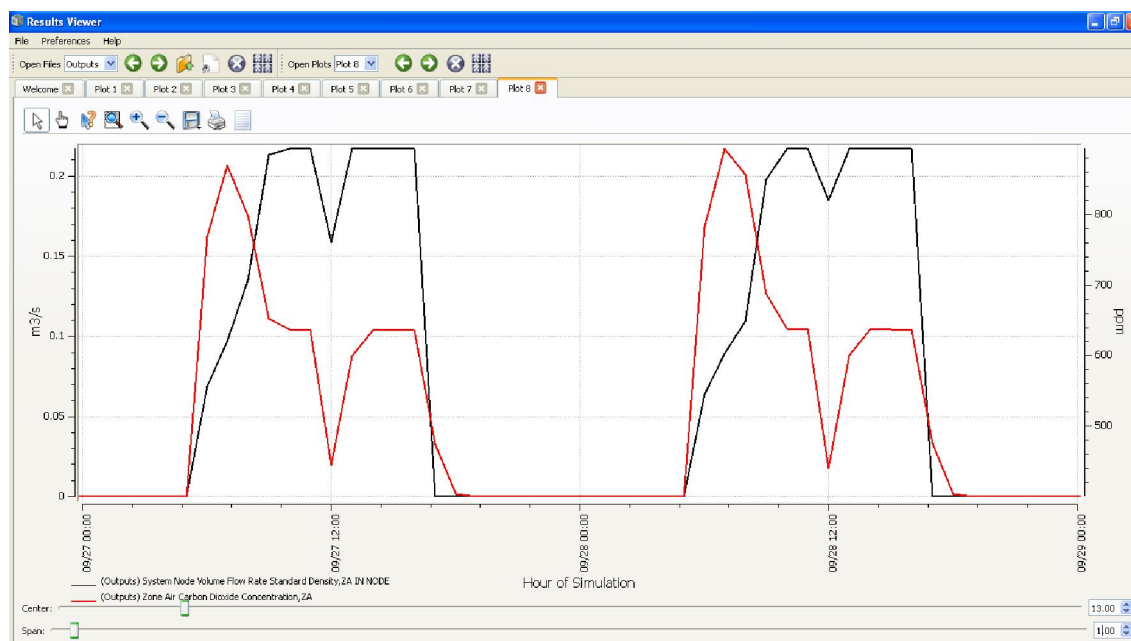


d) Concentração de CO₂ (totalidade do período simulado).

Legenda:

Linha preta: Caudal de ar novo insuflado;

Linha vermelha: Concentração de CO₂.



e) Concentração de CO₂ (pormenor).

Legenda:

Linha preta: Caudal de ar novo insuflado;

Linha vermelha: Concentração de CO₂.

Figura 4.2 – Validação do sistema DOAS-DCV.

A Figura 4.2 permite chegar às seguintes conclusões:

- O caudal de ar insuflado varia ao longo do período de ocupação¹⁷ - ver Figura 4.2 a).
- O funcionamento do recuperador de calor é o esperado – ver Figura 4.2 b). Quando a temperatura exterior é inferior a 20°C o recuperador de calor é acionado e se o balanço térmico permitir 100% de ar novo é aquecido até 20°C. Quando a temperatura do ar rejeitado para o exterior pelo recuperador de calor é inferior à temperatura exterior o recuperador de calor é acionado.
- A regra de controlo definida pela Equação (1) é respeitada – ver Figura 4.2 c). Não se insufla ar na sala a temperaturas abaixo de 20°C e acima de 23°C. O pormenor da figura também permite concluir que o ar é insuflado à temperatura exterior quando esta está compreendida entre 20 e 23°C. *Note-se que no gráfico se apresentam valores de temperatura de insuflação – linha verde – quando a ventilação se encontra desligada (depois das 18h e antes das 7h). Esses valores (gerados numericamente pelo programa EnergyPlus) não possuem significado físico e devem ser desprezados.*
- A concentração de CO₂ na sala não ultrapassa os 900 ppm – ver Figura 4.2 d) e Figura 4.2 e).

¹⁷ Ao valor de caudal insuflado pelo sistema de climatização acresce 0,75 ren./h em período de ocupação devido a infiltração / ventilação natural. No restante tempo a infiltração / ventilação natural é 3 ren./h

Na Figura 4.2 d) é possível distinguir o período de arrefecimento (setembro) com caudais de ventilação elevados para assegurar a manutenção de temperaturas na sala abaixo de 26°C, o período de aquecimento (dezembro), também com caudais de ventilação elevados mas agora para manutenção de temperaturas na sala acima de 20°C. Sempre que os caudais de ventilação são os máximos a concentração de CO₂ desce abaixo de 900 ppm – como se poderá observar no pormenor da Figura 4.2 e). No final de outubro e no princípio de novembro observam-se na Figura 4.2 d) caudais de ventilação menores durante todo o período de funcionamento do sistema, pois são suficientes para assegurar o conforto térmico (temperaturas na sala entre 20°C e 26°C) e permitem a manutenção de concentrações de CO₂ inferiores a 900 ppm.

No Anexo C detalham-se testes aos resultados do modelo de conservação de CO₂ do programa EnergyPlus.

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo usam-se os modelos validados na secção anterior para avaliar vantagens e desvantagens sob o ponto de vista do conforto térmico, qualidade do ar interior e consumo de energia do sistema DOAS-DCV aplicado a uma sala de aula tipo.

A sala de aula tipo é a descrita na secção 2.22.1, termicamente reabilitada e orientada a sul¹⁸. Com efeito, para além de ser esta a orientação aconselhada nos manuais de boas práticas de arquitetura escolar (ver, por exemplo, Parque Escolar, 2009), é também esta a orientação da maioria das salas de aula da E.S. Gil Vicente.

Tal como para os estudos apresentados na secção 4.1, os resultados assentam na determinação de valores acumulados, contabilizando-se apenas dias úteis do calendário escolar das 7h00 às 18h00. Os parâmetros caracterizadores do desempenho dos sistemas são:

- médias, desvios-padrão, máximos e mínimos;
- percentagens de horas com temperatura interior abaixo de 20°C, acima de 26°C e em que a concentração de CO₂ excede 900 ppm – ver Eq. (3);
- desvios médios de temperatura interior (relativamente a 20°C) quando não se atingem os 20°C; (relativamente a 26°C) quando se excedem os 26°C, e; desvio médio de concentração de CO₂ (relativamente a 900 ppm) quando se excede a concentração de 900 ppm – ver Eq. (5).

Distinguem-se dois períodos para obtenção destas percentagens e desvios médios: Período anual e período de aquecimento (dezembro a fevereiro).

Quando se compara o desempenho da sala de aula tipo com o sistema de climatização DOAS-DCV face à mesma sala com um sistema DOAS-CAV considera-se o período anual. Admite-se que o uso de sistema de climatização permite a manutenção de condições interiores de conforto térmico e QAI, sendo reduzido o erro de considerar que as janelas permanecerão normalmente fechadas no período de ocupação. A infiltração / ventilação natural considerada é apenas a resultante da aplicação do modelo DOE2 descrito no Anexo B, com um caudal médio da ordem de 25% de aproximadamente 3 ren./h em período de ocupação e aproximadamente 3 ren./h no restante tempo.

Para a comparação entre o desempenho da sala de aula tipo com o sistema DOAS-CAV e a mesma sala considerando apenas ventilação natural com o modelo DOE2 – casos com

¹⁸ Ao contrário da orientação Norte usada na sala de aula de validação.

caudais médios de ventilação de 1,5 ren./h e 3 ren./h –, consideram-se apenas os resultados para o período de aquecimento entre dezembro e fevereiro, visto que apenas nesse período é legítimo assumir que as janelas se encontram normalmente fechadas.

5.1. DOAS-DCV versus DOAS-CAV

A Tabela 5.1 resume os resultados de modelação obtidos para a sala de aula tipo com os sistemas DOAS-DCV e DOAS-CAV. Os consumos de energia para aquecimento e arrefecimento são os observados nas baterias de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. O consumo de energia total foi determinado admitindo um EER de 3 para produção de água gelada e um COP de 4 para obtenção de água quente, à semelhança dos fatores de conversão sugeridos no RCCTE, (2006).

Tabela 5.1 – Caracterização do desempenho da sala de aula tipo com o sistema DOAS-DCV e comparação com o desempenho da mesma sala com o sistema DOAS-CAV. Apresentam-se ainda dados do ambiente exterior. Período anual, dias úteis do calendário escolar das 7h00 às 18h00, num total de 1740 h.

		Ambiente Exterior	Ambiente Interior – Sala SUL	
			DCV	CAV
Vent. Natural [ren./h]	<i>Média</i>	-	0,4	0,4
	<i>Desv. Padrão</i>	-	0,1	0,1
	<i>Máx.</i>	-	0,8	0,8
	<i>Mín.</i>	-	0,0	0,0
Vent. Mecânica [ren./h]	<i>Média</i>	-	3,6	5,6
	<i>Desv. Padrão</i>	-	1,3	0,1
	<i>Máx.</i>	-	5,8	5,8
	<i>Mín.</i>	-	1,6	5,4
Temperatura	<i>Média [°C]</i>	15,9	25,2	24,3
	<i>Desv. Padrão [°C]</i>	5,1	1,9	2,1
	<i>Máx. [°C]</i>	32,4	30,8	30,8
	<i>Mín. [°C]</i>	4,2	18,0	17,9
	<i>h com Tint<20°C [%]</i>	79,8	0,7	0,8
	<i>h com Tint>26°C [%]</i>	4,8	40,6	18,6
	<i>Desvio qd Tint<20°C [°C]</i>	-6,2	-0,6	-0,6
	<i>Desvio qd Tint>26°C [°C]</i>	2,4	0,8	1,6
Concentração de CO2	<i>Média [ppm]</i>	400,0	806,8	647,6
	<i>Desv. Padrão [ppm]</i>	0,0	109,3	17,9
	<i>Máx. [ppm]</i>	-	975,0	677,3
	<i>Mín. [ppm]</i>	-	604,1	603,3
	<i>h com CO2>900ppm [%]</i>	0,0	39,4	0,0
	<i>Desvio qd CO2>900ppm [ppm]</i>	-	10,9	-
Consumo de Energia [kWh/m2]	<i>Aquec [kWh térmico]</i>	-	2,3	8,6
	<i>Arref [kWh térmico]</i>	-	3,3	3,3
	<i>Ventil [kWh elétrico]</i>	-	2,9	4,6

	<i>Total [kWh elétrico]</i>	-	4,5	7,9
Potência	<i>Média</i>	-	101,1	431,9
Aquecimento	<i>Máx.</i>	-	1783,2	2189,3
[W térmico]	<i>Mín.</i>	-	0,0	0,0
Potência	<i>Média</i>	-	187,6	317,5
Arrefecimento	<i>Máx.</i>	-	2190,4	2247,7
[W térmico]	<i>Mín.</i>	-	0,0	0,0
Potência	<i>Média</i>	-	79,1	127,3
Ventilação	<i>Máx.</i>	-	126,0	127,3
[W elétrico]	<i>Mín.</i>	-	54,6	127,3

Da Tabela 5.1 conclui-se:

- Serem elevadas as temperaturas médias na sala, por se tratar de uma sala com orientação Sul e serem elevados os ganhos internos e através da envolvente transparente.
- O sistema DOAS-DCV origina uma percentagem de horas com temperatura interior superior a 26°C elevada (40,6%). Mas isto resulta do controlo implementado porque, como se vê, o desvio médio da temperatura relativamente aos 26°C é de apenas 0,8 K.
- O sistema DOAS-DCV origina uma percentagem de horas com concentração de CO₂ superior a 900 ppm elevada (39,4%). Mas isto resulta do controlo implementado porque, como se vê, o desvio médio da temperatura relativamente aos 900 ppm é de apenas 10,9 ppm.
- Sob o ponto de vista do conforto térmico e da qualidade do ar interior o sistema DOAS-CAV possui um melhor desempenho.
- Sob o ponto de vista do consumo energético o sistema DOAS-DCV reduz o consumo em aproximadamente 40% face ao sistema DOAS-CAV.
- O sistema DOAS-DCV permite poupar energia no período de aquecimento. Ganhos elevados na sala de aula contribuem para manter temperaturas interiores acima de 20°C, e o limite da concentração de CO₂ em 900 ppm pode ser atingido com caudais inferiores ao usado no sistema DOAS-CAV.
- Os sistemas modelados não possuem potência suficiente para manter, sempre, a temperatura interior compreendida entre os ajustes definidos. Esta insuficiência é mais importante no arrefecimento da sala.

5.2. DOAS-DCV versus Ventilação Natural

A Tabela 5.2 resume os resultados de modelação obtidos para a sala de aula tipo com o sistema DOAS-DCV e admitindo a mesma sala apenas com ventilação natural. Os consumos de energia para aquecimento e arrefecimento são os observados nas baterias de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. O consumo de energia total foi determinado admitindo um EER de 3 para produção de água gelada e um COP de 4 para obtenção de água quente, à

semelhança dos fatores de conversão sugeridos no RCCTE, (2006).

Tabela 5.2 – Caracterização do desempenho da sala de aula tipo com o sistema DOAS-DCV e comparação com o desempenho da mesma sala ventilada de modo natural (1,5 ren./h e 3,0 ren./h). Apresentam-se ainda dados do ambiente exterior. Período entre dezembro e fevereiro, dias úteis do calendário escolar das 7h00 às 18h00, num total de 511 h.

		Ambiente Exterior	Ambiente Interior – Sala SUL		
			DCV	Vent.Nat.	Vent.Nat.
				1,5 ren./h	3,0 ren./h
Vent. Natural [ren./h]	Média	-	0,4	1,5	3,0
	Desv.Padrão	-	0,1	0,5	1,0
	Máx.	-	0,8	3,0	6,0
	Mín.	-	0,0	0,0	0,0
Vent. Mecânica [ren./h]	Média	-	2,8	-	-
	Desv.Padrão	-	0,7	-	-
	Máx.	-	5,6	-	-
	Mín.	-	1,7	-	-
Temperatura	Média [°C]	12,0	23,8	22,7	19,8
	Desv.Padrão [°C]	2,7	1,6	2,5	2,5
	Máx. [°C]	18,7	26,2	30,3	26,6
	Mín. [°C]	4,2	18,0	14,5	11,5
	h com Tint<20°C [%]	100,0	2,4	12,7	55,3
	h com Tint>26°C [%]	0,0	9,6	11,6	0,8
	Desvio qd Tint<20°C [°C]	-8,0	-0,6	-1,3	-2,0
	Desvio qd Tnt>26°C [°C]	-	0,0	1,2	0,5
Concentração de CO2	Média [ppm]	400,0	875,8	1418,3	977,2
	Desv.Padrão [ppm]	0,0	66,8	642,5	511,5
	Máx. [ppm]	-	975,0	7456,7	6203,4
	Mín. [ppm]	-	612,6	759,3	614,6
	h com CO2>900ppm [%]	0,0	65,7	82,7	25,3
	Desvio qd CO2>900ppm [ppm]	-	11,4	624,4	497,8
Consumo de Energia [kWh/m2]	Aquec [kWh térmico]	-	1,7	0,0	0,0
	Arref [kWh térmico]	-	0,0	0,0	0,0
	Ventil [kWh elétrico]	-	0,7	0,0	0,0
	Total [kWh elétrico]	-	1,1	0,0	0,0
Potência Aquecimento [W térmico]	Média	-	193,7	0,0	0,0
	Máx.	-	1783,2	-	-
	Mín.	-	0,0	-	-
Potência Arrefecimento [W térmico]	Média	-	0,2	0,0	0,0
	Máx.	-	0,9	-	-
	Mín.	-	0,0	-	-
Potência Ventilação [W elétrico]	Média	-	63,5	0,0	0,0
	Máx.	-	126,0	-	-
	Mín.	-	55,2	-	-

Da Tabela 5.2 conclui-se:

- As renovações de ar considerando o sistema DOAS-DCV são em média maiores do que considerando ventilação natural, mas próximas de 3 h^{-1} .

- O sistema DOAS-DCV permite ambientes confortáveis, mas com temperatura interior média elevada – aproximadamente 24°C –, resultado dos elevados ganhos de calor e da lei de controlo implementada.

- O sistema DOAS-DCV origina uma percentagem de horas com concentração de CO_2 superior a 900 ppm elevada (65,7%), mas isto resulta do controlo implementado porque, como se vê, o desvio médio da concentração relativamente aos 900 ppm é de apenas 11,4 ppm.

- Porque as cargas térmicas do ar novo são neutralizadas pelo sistema DOAS-DCV, o desvio padrão das temperaturas interiores considerando a implementação deste sistema é menor. A aleatoriedade na temperatura interior nos casos com ventilação natural está na origem de maior desconforto; vejam-se as maiores percentagens de horas com temperaturas interiores abaixo de 20°C e acima de 26°C e os maiores desvios médios relativamente a estas temperaturas.

- A ventilação natural da sala de aula com $1,5 \text{ ren./h}$ permite ambientes térmicos interiores, em média, aceitáveis; porém, com concentração média de CO_2 muito elevada¹⁹, observando-se em 82,7% do tempo concentrações superiores a 900 ppm e desvio médio relativamente a esta concentração apreciável: 624,4 ppm.

- A ventilação natural da sala de aula com $3,0 \text{ ren./h}$ reduz a concentração média de CO_2 para valores aceitáveis, próximos dos 900 ppm; contudo, o ambiente térmico interior torna-se muito desconfortável, com temperaturas interiores médias baixas e uma percentagem de horas com temperaturas abaixo de 20°C elevada (55,3%).

¹⁹ Se bem que em linha com o reportado no artigo de Santamouris (2008), que tem por base medições efetuadas em sala de aula.

Capítulo 6

Conclusão

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões dos estudos realizados. Apresentam-se ainda temas para desenvolvimento futuro e uma nota sobre o uso do programa EnergyPlus.

6.1. Conclusões dos estudos realizados

- i) A ventilação natural introduz uma variabilidade no comportamento térmico e na QAI da sala de aula incompatível com a “rigidez” do estabelecido no RSECE (2006).
- ii) Se a formulação dos limites de aceitabilidade térmica e de QAI em salas de aula prever a possibilidade de incumprimento até uma determinada percentagem máxima de horas durante o período de utilização da sala²⁰, e essa percentagem não for demasiado restritiva²¹, torna-se possível ventilar naturalmente salas de aula.
- iii) Ultrapassar os limites de aceitabilidade térmica ou de QAI pode ser irrelevante ou muito grave, função do desvio observado. Para o presente estudo entendem-se como irrelevantes desvios 0,5°C abaixo e acima de 20°C e 26°C, respetivamente e $0,5 \times 10^2$ ppm acima de 9×10^2 ppm. Existe vantagem em fazer acompanhar a definição de limites de aceitabilidade (em *standards* ou legislação) da definição da precisão aplicável (sugere-se, precisão às unidades para temperaturas e às centenas para a concentração de CO₂) evitando confundir desvios irrelevantes e graves.
- iv) O sistema DOAS-CAV baseado na exigência do RSECE (2006) de caudais de ar novo de 30 m³/h/pessoa permite manter concentrações de CO₂ na sala de aula significativamente abaixo de 900 ppm (e do limite de aproximadamente 1000 ppm

²⁰ Como previsto em diferentes normas, por exemplo, EN 15251 (2007), que permite desvios (acima ou abaixo) das especificações em 5% do período de ocupação, ou como referido no manual da Parque Escolar (Parque Escolar, 2009b), onde se refere a possibilidade de exceder o limite superior de temperatura interior de 28°C em 5% do período de ocupação.

²¹ A julgar pelos resultados apresentados na Tabela 5.2, o (habitual) valor de 5% é demasiado restritivo, caso se pretenda ventilar salas de aula de forma natural.

definido no mesmo RSECE). Se se aceitar para indicador de QAI numa sala de aula a concentração de CO₂, o caudal de ar novo de 30 m³/h/pessoa é excessivo.

- v) O sistema DOAS-DCV permite manter concentrações de CO₂ em sala de aula abaixo de 900 ppm com caudais de ar novo inferiores a 30 m³/h/pessoa. Para a sala de aula tipo analisada no presente estudo²² a redução anual do consumo de energia final²³ por redução do caudal de insuflação é da ordem de 40%.

6.2. Temas para desenvolvimento futuro

Propõe-se o seguinte tema para desenvolvimento futuro:

- Estudo da ventilação natural de salas de aula assistida por sistemas passivos (e.g., chaminés solares, permutadores de calor ar-solo).

Nota sobre o uso do programa EnergyPlus

Face à existência de software de modelação do comportamento térmico de edifícios em que é disponibilizado acesso gratuito ao código fonte julga-se ser importante aprofundar o estudo desse software. Com efeito, na customização de sistemas AVAC com o programa EnergyPlus não é possível o uso de ferramentas de *debugging* eficazes, sendo ainda em muitos casos insuficiente a documentação sobre as rotinas implementadas. Estes dois fatores dificultam a investigação com recurso ao programa EnergyPlus.

²² Típica de uma escola nacional com arquitetura JCETS-MOP reabilitada pela Parque Escolar.

²³ Energia elétrica, considerando um EER de 3 para produção de água gelada e um COP de 4 para produção de água quente.

Referências

- ANSI/ASHRAE Standard 62.1 – 2007, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning, Inc.
- Apte, M., 2006, A Review of Demand Control Ventilation, LBNL-60170 Report (<http://eetd.lbl.gov/ie/pdf/LBNL-60170.pdf> acedido a 14 de maio de 2011).
- ASHRAE, 2007, ASHRAE Handbook – HVAC Applications (SI), American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning, Inc.
- ASHRAE, 2008, ASHRAE Handbook – HVAC Systems Equipment (SI), American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning, Inc.
- BBC News, 2007, "Education, education, education", (<http://newsvote.bbc.co.uk/mpapps/pagetools/print/news.bbc.co.uk/2/hi/uknews/education/6564933.stm>, acedido em novembro de 2010).
- Emmerich, S., Persily, A., 2001, State-of-the-Art Review of CO₂ Demand Controlled Ventilation Technology and Application, NISTIR 6729 (<http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build01/art117.html> acedido a 15 de maio de 2011).
- EN 15251, 2007, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, CEN.
- EN 12464-1, 2002, Artificial lighting of interiors; lighting of rooms with VDU work stations or VDU assisted workplaces, CEN.
- EnergyPlus, 2010a, Getting Started With EnergyPlus, Basic Concepts Manual – Essential Information You Need about Running EnergyPlus, The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- EnergyPlus, 2010b, EnergyPlus Input Output Reference – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- EnergyPlus, 2010c, EnergyPlus Engineering Reference – The Reference to EnergyPlus Calculations, The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- E.S. Gil Vicente, 2010, (<http://www2.esec-gil-vicente.rcts.pt/>, acedido em dezembro de 2010).
- INETI, 2005, Synthetic data for Portugal, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, Lisboa, Portugal, (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm, acedido a 16 de novembro de 2011).

- Jenkins, P., 2002, Letter to Brian Alcorn of CEC, (http://www.energy.ca.gov/title_24/2005_standards/archive/documents/2002-11-05_workshop/public_comments/2002-12-20_ARB_DCV.pdf acedido a 14 de maio de 2011).
- Leephakpreeda, T., et al, 2001, “Occupancy-Based Control of Indoor Air Ventilation: A Theoretical and Experimental Study”, Science Asia, No. 27, pp. 279 – 284.
- Murphy, J., 2008, CO₂ – Based Demand-Controlled Ventilation with ASHRAE Standard 62.1, Fastrack Newsletter (<http://hvac.com/fastrack/fastrack-murphy09-10-08/> acedido a 14 de maio de 2011).
- Neymark, J, et al., 2001, HVAC BESTEST: A Procedure for Testing the Ability of Whole-Building Energy Simulation Programs to Model Space Conditioning Equipment, Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, pp.369-376.
- Nicol, J.F., 2001, Characterising Occupant Behaviour in Buildings: Towards a Stochastic Model of Occupant use of Windows, Lights, Blinds, Heaters and Fans, Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, pp. 1073-1078.
- Novas Oportunidades, 2010, (<http://www.novasoportunidades.gov.pt/np4/7.html>, acedido em novembro de 2010).
- Parque Escolar, 2009a, Manual de Projeto: Arquitetura, Versão 2.1,(<http://www.parque-escolar.pt/publicacoes-parque-escolar.php>, acedido a 22 de maio de 2011).
- Parque Escolar, 2009b, Manual de Projeto: Instalações Técnicas, Versão agosto de 2009, (<http://www.parque-escolar.pt/publicacoes-parque-escolar.php>, acedido a 22 de maio de 2011).
- Parque Escolar, 2010, “Relatório de Sustentabilidade 2009 – Parque Escolar”, Parque Escolar, E.P.E.
- Parque Escolar, 2011a (<http://www.parque-escolar.pt/> acedido em 15 de maio de 2011).
- Parque Escolar, 2011b, (<http://www.parque-escolar.pt/escola-secundaria-gil-vicente.php>, acedido a 22 de maio de 2011).
- Persily, A., et al, 2003, Simulations of Indoor Air Quality and Ventilation Impacts of Demand Controlled Ventilation in Commercial and Institutional Buildings, NISTIR 7042 Report (<http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build03/art074.html> acedido a 14 de maio de 2011).
- Portaria nº461/2007, 5 de junho.
- RCCTE, 2006, Decreto-Lei nº 80/2006, 4 de abril.
- RSECE, 2006, Decreto-Lei nº 79/2006, 4 de abril.
- SCE, 2006, Decreto-Lei nº 78/2006, 4 de abril.
- Santamouris, M., et al., 2008, Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation, Energy and Buildings 40, pp.1833–1843.

- Wargocki, P., Wyon, D., 2011a, "The Effects of Outdoor Air Supply Rate and Supply Air Filter Condition in Classrooms on the Performance of Schoolwork by Children (RP-1257)", HVAC&R Research, Vol 13, No 2, pp 165-191.
- Wargocki, P., Wyon, D., 2011b, "The Effects of Moderately Raised Classroom Temperatures and Classroom Ventilation Rate on the Performance of Schoolwork by Children (RP-1257)", HVAC&R Research, Vol 13, No 2, pp 193-220.

Anexo A

Sobre o clima de Lisboa

O clima não pode ser considerado nem completamente determinístico nem completamente aleatório. O movimento de translação da terra em torno do sol e o movimento de rotação da terra conferem características determinísticas ao clima (com harmónicas fundamentais com período de 365,25 dias e 24 horas). No entanto, as interações entre a energia solar recebida, a energia gerada na própria terra e aquilo que é o sistema terra, sobrepõem uma componente aleatória, responsável pela variabilidade existente de dia para dia, de estação para estação e de ano para ano.

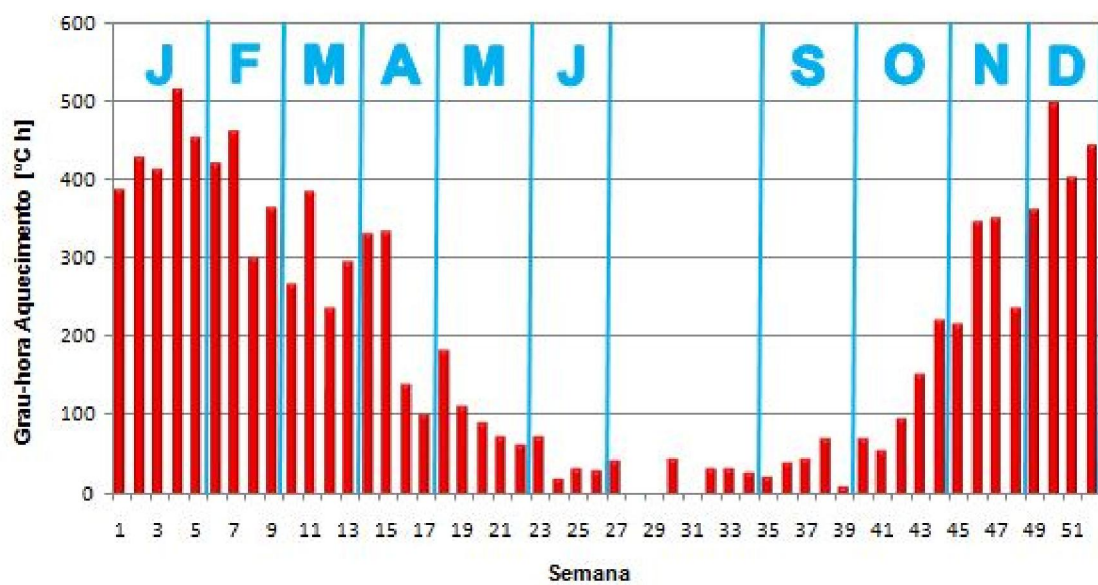
Neste trabalho admite-se, sem mais justificação, que o clima em Lisboa é caracterizado pelos dados incluídos no ficheiro TRY de Lisboa (INETI, 2005). Trata-se de um ficheiro (com formato e gerado de acordo com os procedimentos) TMY2 (*typical meteorological year*) com series temporais de 8760 elementos de diferentes parâmetros climáticos: temperatura de bolbo seco, temperatura de ponto de orvalho, pressão atmosférica, humidade relativa, velocidade e direção do vento, temperatura do céu, radiação solar (global horizontal, difusa, direta normal), iluminância (global horizontal, difusa, direta normal), nebulosidade, precipitação, temperatura do solo (não perturbado, mensal), entre outros.

Os ficheiros TRY2 são desenvolvidos especificamente para o estudo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento associadas a sistemas térmicos, sendo muito usados na simulação dinâmica detalhada de edifícios (e também painéis solares).

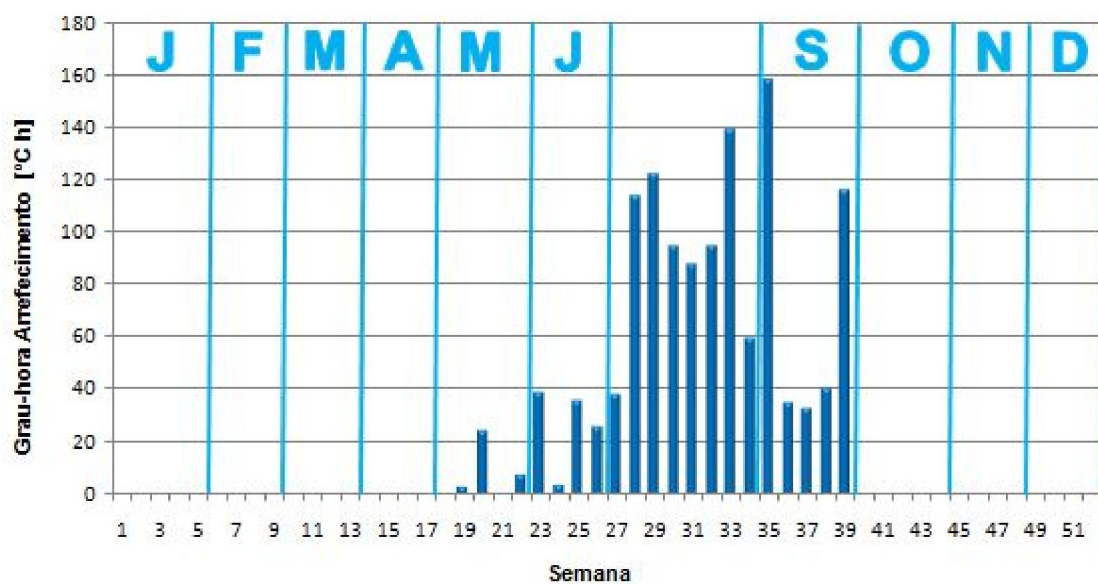
O clima influencia o comportamento térmico de salas de aula. Importa, por isso, que nos debrucemos sobre o conteúdo do ficheiro climático TRY de Lisboa. Na Figura A.1 apresenta-se, para as 52 semanas do ano, valores semanais de graus-hora de aquecimento (base 20°C) e graus-hora de arrefecimento (base 26°C).

As bases escolhidas correspondem aos limites de aceitabilidade de temperatura em salas de aula de edifícios novos ou renovados, conforme definido na norma EN 15251 (2007).

A Figura A.1 permite concluir que, para as temperaturas base de aquecimento e arrefecimento definidas, e atendendo ao clima de Lisboa, as necessidades de aquecimento – relembra-se, no ambiente exterior – são dominantes. Do período de ocupação da sala de meados de setembro a meados de junho, apenas setembro revela necessidades de arrefecimento significativas. O mês de outubro é também um mês ameno, equivalente ao mês de maio sob o ponto de vista das necessidades de aquecimento. O mês de novembro, em especial a primeira metade do mês, assim como a última metade do mês de abril são, também, meses sem grandes necessidades de aquecimento. Os meses de dezembro, janeiro e fevereiro são, por excelência, de aquecimento.



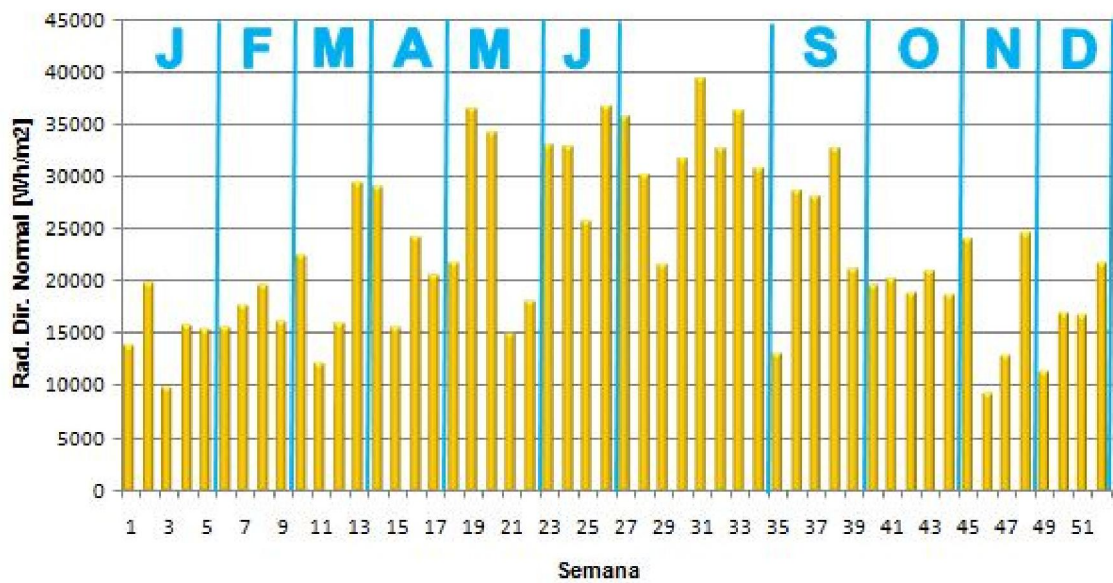
a)



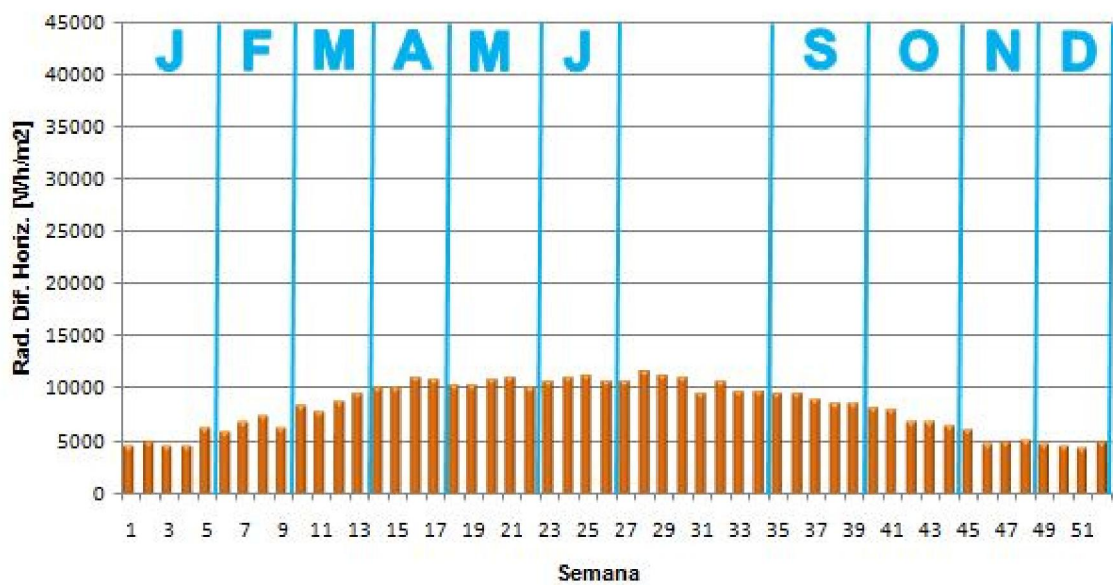
b)

Figura A.1 – Valores semanais de graus-hora de (a) aquecimento (base 20°C) e (b) arrefecimento (base 26°C).

Na Figura A.2 apresentam-se valores semanais de (densidade) energia solar direta normal e energia difusa horizontal.



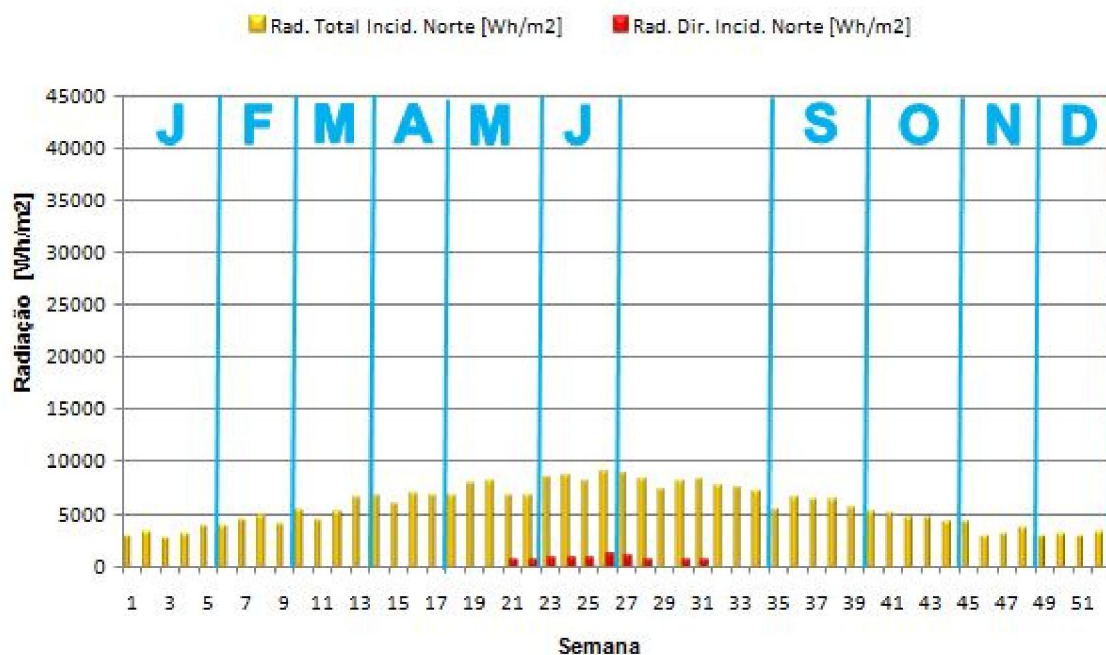
a)



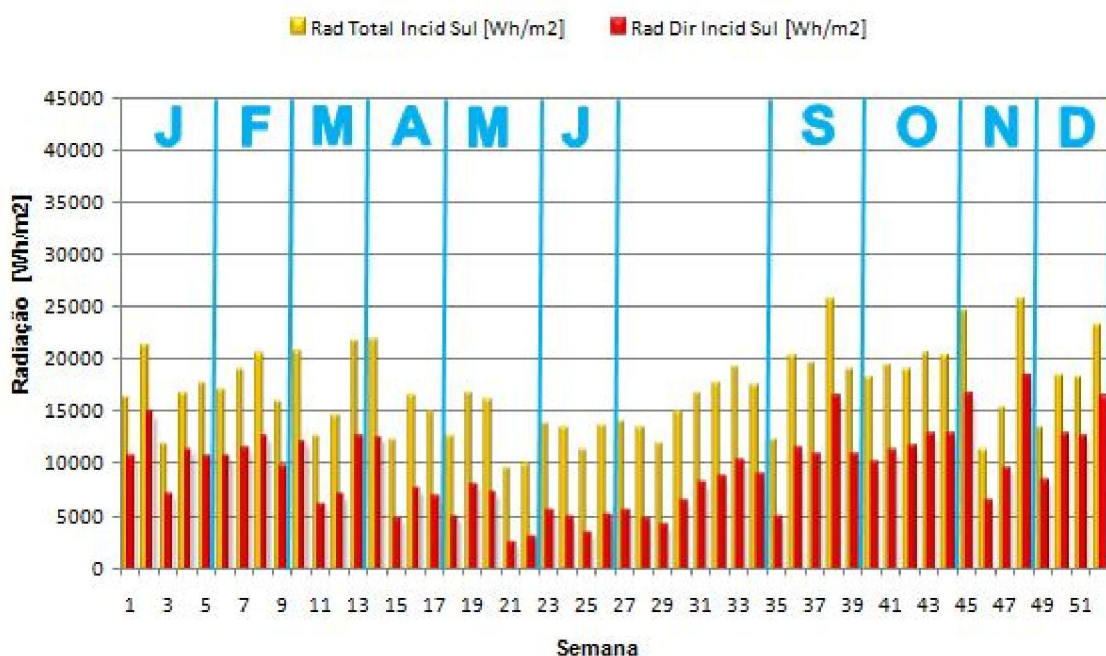
b)

Figura A.2 – Valores semanais de (a) energia solar direta normal e (b) energia difusa horizontal.

Na Figura A.3 apresentam-se valores semanais de (densidade) energia solar incidente (total e direta)²⁴ em superfícies verticais orientadas a Norte e Sul.



a)



b)

Figura A.3 – Valores semanais de energia solar incidente total e energia solar incidente direta em superfícies verticais orientadas a (a) Norte e (b) Sul.

²⁴ A energia solar incidente total é o somatório das incidentes direta, difusa vinda do céu e difusa vinda do solo.

Observando a Figura A.3 a) conclui-se que em superfícies orientadas a Norte quase não incide radiação direta, no entanto, a radiação difusa incidente não é desprezável, fazendo com que de março a outubro a energia total incidente seja sempre da ordem de grandeza ou superior a 5 kWh/m^2 (por semana, considerando apenas o período entre as 8h00 e as 18h00).

Na Figura A.3 b) destaca-se o facto da energia solar total incidente em superfícies orientadas a Sul ser significativa nos meses mais frios de dezembro, janeiro e fevereiro. Salienta-se, ainda, os elevados valores de radiação incidente no mês de setembro que, a adicionar às elevadas temperaturas do ar – ver Figura A.1 – não deixará de se fazer notar aquando do cálculo das cargas térmicas na sala.

Da análise efetuada conclui-se:

- i) Ser o mês de setembro adequado ao estudo do comportamento típico de uma sala de aula localizada em Lisboa, num mês de verão.
- ii) Serem os meses de abril, maio e junho e de outubro e novembro adequados ao estudo do comportamento típico de uma sala de aula localizada em Lisboa, nas estações intermédias.
- iii) Serem os meses de dezembro, janeiro e fevereiro adequados ao estudo do comportamento típico de uma sala de aula localizada em Lisboa, em meses de inverno.

Anexo B

Sobre os modelos de infiltração / ventilação natural no EnergyPlus

A infiltração / ventilação natural depende das forças de impulsão térmica e dos gradientes de pressão entre fachadas do edifício que, por sua vez, se relacionam com a velocidade e direção do vento. A modelação da ventilação de salas de aula é um tema que justifica trabalhos científicos independentes e ultrapassa os objetivos definidos para a presente tese. No presente estudo aproveitou-se o modelo de infiltração / ventilação natural definido no programa EnergyPlus (EnergyPlus, 2010b). Este modelo considera a seguinte expressão geral.

$$\dot{V}(t) = \dot{V}_{nominal} \times Calendario(t) \times [A + B(T_{int}(t) - T_{ext}(t)) + C \times v(t) + D \times v^2(t)] \quad (B.1)$$

onde,

$\dot{V}(t)$ é o caudal de ar infiltrado, m³/s;

$\dot{V}_{nominal}$ é o caudal de infiltração nominal, m³/s;

$Calendario(t)$ um número fracionário entre 0 e 1 que modela um calendário, adimensional;

$T_{int}(t)$ é a temperatura na sala, °C;

$T_{ext}(t)$ é a temperatura exterior (bolbo seco), °C;

$v(t)$ é a velocidade do vento, m/s;

A, B, C e D são fatores que permitem “afinar” o modelo de infiltração, adimensionais.

O manual do programa (EnergyPlus, 2010b) refere a existência de três modelos:

- modelo EnergyPlus, com A=1, B=C=D=0;
- modelo DOE2 com C=0,224, A=B=D=0, e;
- modelo BLAST com A=0,606, B=0.03636, C=0.1177 e D=0.

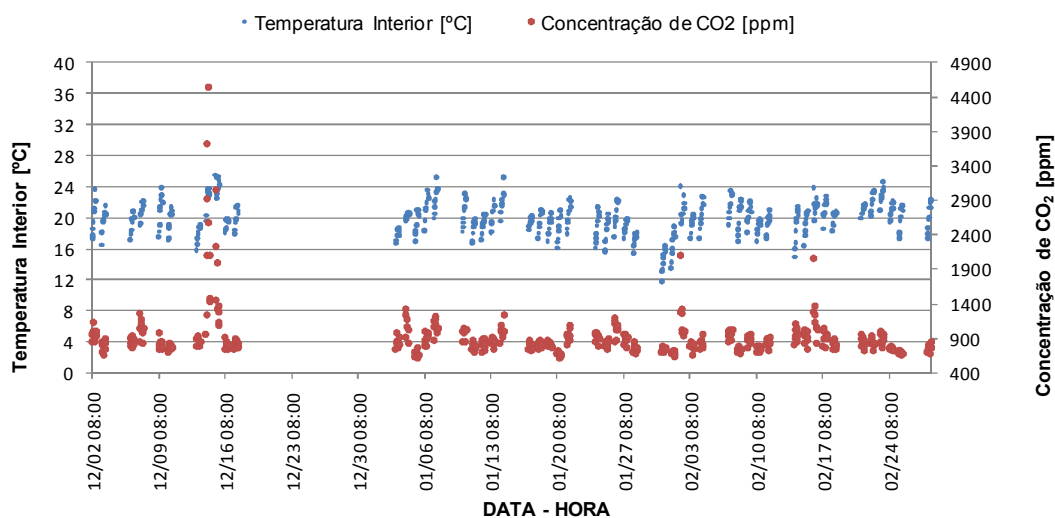
O modelo EnergyPlus considera o caudal de infiltração igual a um valor nominal sempre constante. Este é um modelo demasiado simplista para o estudo de salas ventiladas de forma natural.

Quanto ao modelo DOE2, e de acordo com EnergyPlus (2010b), para condições “típicas” de inverno ($\Delta T = 40$ K; $v = 6$ m/s) resulta num fator multiplicativo do caudal nominal $\dot{V}_{nominal}$ de 1,34. Em condições “típicas” de verão ($\Delta T = 0$ K; $v = 3,35$ m/s) resulta num fator multiplicativo do caudal nominal de 0,75. Importa referir que este modelo não tem em consideração as forças de impulsão térmica. Este facto contradiz a física do fenómeno de ventilação constituindo uma desvantagem importante do modelo DOE2. Porém, sempre que o peso da impulsão térmica seja reduzido, o modelo DOE2 poderá ser adequado.

Quanto ao modelo BLAST, também de acordo com EnergyPlus (2010c), para as condições “típicas” de inverno e verão referidas resultam os fatores multiplicativos do caudal nominal $\dot{V}_{nominal}$ 2,75 e 1, respetivamente. Este modelo já considera as forças de impulsão térmica e velocidade do vento, no entanto, inclui uma componente de infiltração / ventilação independente do clima (fator A) demasiado expressiva: quase 2/3 do caudal nominal.

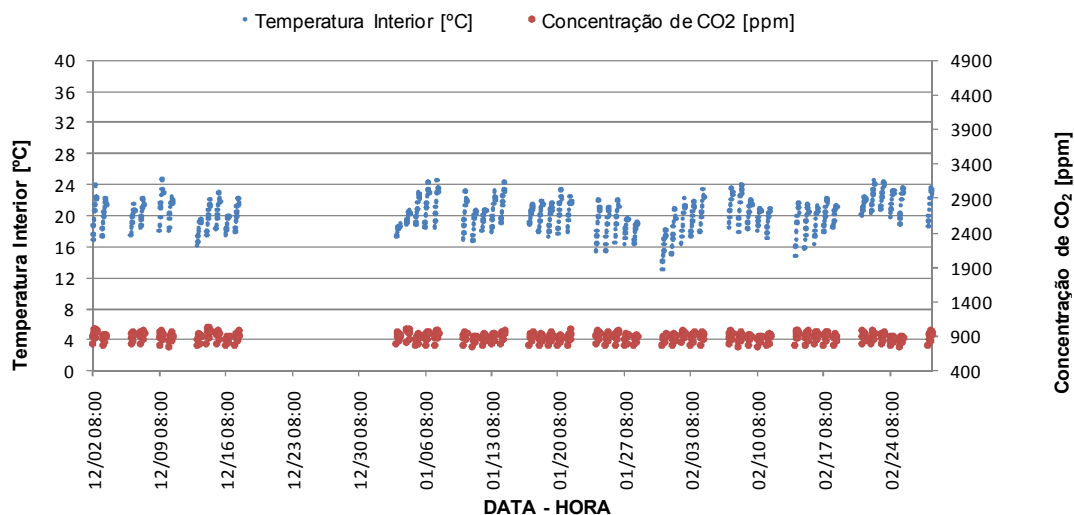
Obtiveram-se resultados com ambos os modelos DOE2 e BLAST para uma sala de aula entre dezembro e fevereiro. O caudal nominal foi selecionado (por tentativa e erro) de forma a garantir uma concentração de CO_2 horária média de 900 ppm²⁵.

A Figura B.1 apresenta o gráfico de dispersão de temperatura e concentração de CO_2 no interior da sala, considerando os modelos DOE2 e BLAST.



a)

²⁵ Dias úteis do calendário escolar entre as 7h00 e as 18h00.

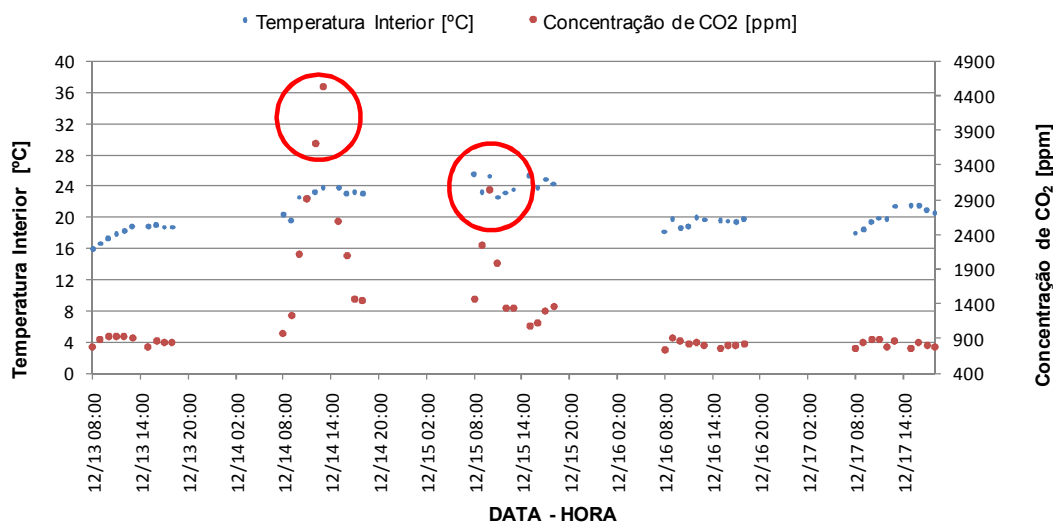


b)

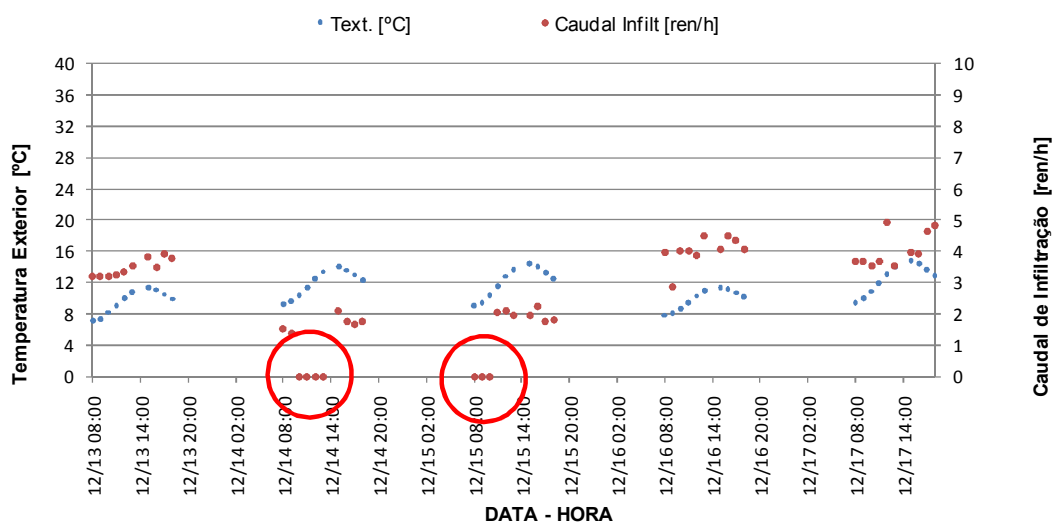
Figura B 1 – Temperatura e concentração de CO₂ na sala de aula: a) modelo de infiltração DOE2; b) Modelo de infiltração BLAST.

Da Figura B.1 b) destaca-se a uniformidade dos valores de concentração de CO₂ obtidos com o modelo BLAST, contrastando com os resultados na Figura B.1a) para o modelo DOE2. Com efeito, como o modelo de infiltração do DOE2 é unicamente função da velocidade do vento e este parâmetro possui uma componente estocástica apreciável, os caudais de infiltração adquirem também esta característica de aleatoriedade.

A Figura B.2 apresenta um pormenor da 3^a semana de dezembro e a evolução da temperatura do ar exterior e do caudal de infiltração.



a)



b)

Figura B.2 – (a) Pormenor da 3ª semana de dezembro da Figura B.1 e (b) detalhe de temperatura exterior e caudal de infiltração. Modelo infiltração DOE2.

Destaca-se, na Figura B.2, o efeito no modelo de infiltração DOE2 de uma velocidade do ar nula (ou muito reduzida). Nos dias 14 e 15 registaram-se horas com velocidade do vento nula; logo, com caudal de infiltração nulo – círculos vermelhos. Note-se, ainda, o efeito que isto teve na concentração de CO₂ na sala de aula, que aumentou significativamente.

Atendendo ao descrito por Santamouris (2008) relativamente à variabilidade dos valores de concentrações de CO₂ em salas de aula sem ventilação mecânica, os resultados obtidos com o modelo de infiltração DOE2 parecem mais ajustados à realidade. A existência de uma componente estocástica (aleatoriedade) no modelo de infiltração DOE2 – componente esta

praticamente ausente no modelo BLAST – sugere a maior adequação deste modelo ao estudo de salas ventiladas naturalmente. Assim, nas análises efetuadas optou-se por se dar privilégio ao modelo de infiltração DOE2.

Anexo C

Sobre a equação do decaimento

A equação do decaimento aplicável ao estudo da concentração de CO₂ numa sala de aula tem a seguinte forma

$$\frac{dm\phi}{dt} + \dot{m}\phi = \dot{m}\phi_1 + S_\phi \quad (\text{C. 1})$$

com

ϕ a concentração de CO₂ do ar da sala, ppm;

ϕ_1 a concentração de CO₂ do ar insuflado na sala, ppm;

\dot{m} o caudal mássico de ar insuflado na sala²⁶, kg/s;

$S_\phi = \rho S_{CO_2}^V \cdot (n \cdot P_{pessoa}) \cdot 10^6$ caudal mássico de CO₂ gerado na sala, kgCO₂/s.

Na expressão de S_ϕ considera-se:

ρ , a massa específica do ar na sala, kg/m³;

$S_{CO_2}^V$, o caudal volúmico específico de CO₂ gerado na sala, expresso em m³/s/W, que depende da potência térmica (W) libertada pelos n ocupantes;

S_{pessoa} , a potência térmica gerada por cada um dos n ocupantes, W/pessoa, e;

fator 10⁶ deriva das concentrações estarem expressas em ppm.

Multiplicando ambos os membros de (C. 1) por

²⁶ Por conservação de massa, igual ao caudal extraído.

$$e^{\frac{\dot{m}}{\rho V}t} \quad (\text{C. 2})$$

com V o volume da sala de aula, m^3 , e t o tempo, s, obtém-se

$$\frac{d}{dt} \left(\rho V \phi e^{\frac{\dot{m}}{\rho V}t} \right) = (\dot{m} \phi_1 + S_\phi) e^{\frac{\dot{m}}{\rho V}t}. \quad (\text{C. 3})$$

Integrando (C. 3) e admitindo que ρ , \dot{m} , ϕ e S_ϕ permanecem constantes no intervalo de integração $[t_k, t_{k+1}]$ obtém-se

$$A + \rho V \phi e^{\frac{\dot{m}}{\rho V}t} = (\dot{m} \phi_1 + S_\phi) \frac{\rho V}{\dot{m}} e^{\frac{\dot{m}}{\rho V}t} \quad (\text{C. 4})$$

sendo A uma constante de integração.

Desenvolvendo (C. 4) obtém-se, com $B = \frac{\dot{m}}{\rho V} A$

$$B e^{-\frac{\dot{m}}{\rho V}t} = \dot{m} \phi_1 - \dot{m} \phi + S_\phi. \quad (\text{C. 5})$$

Com a condição inicial $\phi(t=0) = \phi_0$ obtém-se a constante B ,

$$B = \dot{m} \phi_1 - \dot{m} \phi + S_\phi. \quad (\text{C. 6})$$

Substituindo B em (C. 5) e desenvolvendo chega-se à solução da equação de decaimento (C. 1):

$$\phi = \phi_0 e^{-\frac{\dot{m}}{\rho V}t} + \left(\phi_1 + \frac{S_\phi}{\dot{m}} \right) \left(1 - e^{-\frac{\dot{m}}{\rho V}t} \right). \quad (\text{C. 7})$$

Esta solução é mal comportada quando $\dot{m} = 0$.

Com o objetivo de comprovar a modelação da concentração de CO₂ numa sala implementada no programa EnergyPlus, compararam-se resultados da solução analítica (C. 7) com resultados obtidos pelo programa EnergyPlus.

Admitiu-se²⁷:

$$\begin{aligned}\phi_1 &= 400 \text{ ppm} \\ S_{CO_2}^V &= 3,28 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s/W} \\ n &= 21,6 \text{ pessoas} \\ S_{\text{pessoa}} &= 86,25 \text{ W/pessoa} \\ \Delta t &= 60 \text{ s}\end{aligned}\tag{C 8}$$

onde,

Δt é o intervalo de integração considerado.

Os valores de caudal mássico de ar insuflado \dot{m} e de massa específica do ar na sala ρ foram aqueles que resultaram dos balanços de massa e de energia realizados pelo programa EnergyPlus em cada intervalo de integração.

A Figura C. 1 compara a solução analítica com os resultados obtidos pelo programa EnergyPlus.

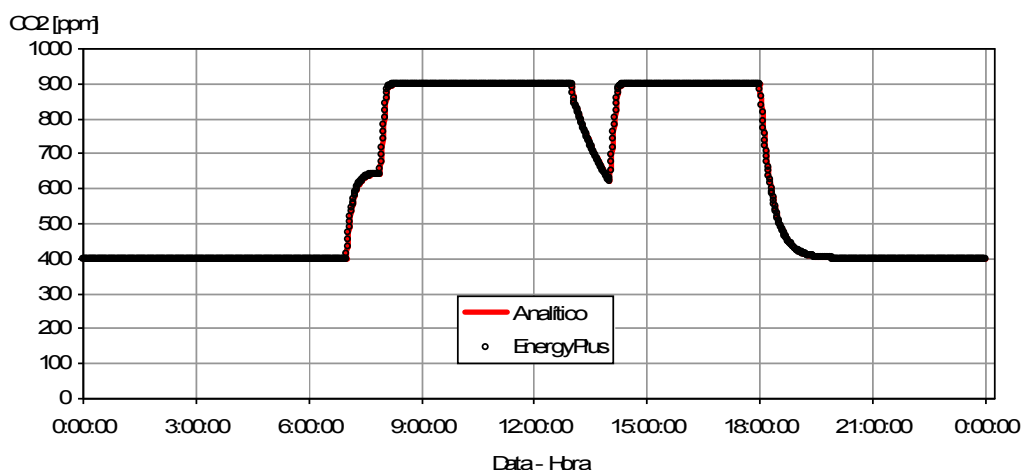


Figura C. 1 – Evolução de concentração de CO₂ ao longo de um dia – Comparação entre resultados analíticos e resultados obtidos com o programa EnergyPlus.

²⁷ Apesar de uma ocupação de 25 alunos e 1 professor, há que entrar em conta com os períodos de intervalo de 15 minutos a cada 1,5 h de aula, justificando-se a redução no ganho específico de ocupação.

Da Figura C. 1 conclui-se a concordância entre solução analítica e o resultado do programa EnergyPlus.